



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ENERGETICKÁ NÁROČNOST VÝROBY PIVA

ENERGY USAGE OF BEER PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Maťa

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jakub Mat'a**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Hejčík, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Energetická náročnost výroby piva

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V technologii výroby piva hraje důležitou roli teplo a chlad, kdy nejprve je potřeba tepla pro vytvoření pивní mladiny, která následně za působení chladu kvasí a zraje v konečný produkt – pivo. Teplo i chlad jsou většinou vyráběny odděleně, čímž roste energetická náročnost piva. Otázkou je, zdali by nebylo možné výrobu tepla a chladu zajistit tepelným čerpadlem, čímž by docházelo k určité rekuperaci energie a tím i ke snížení energetické náročnosti piva.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je provést analýzu energetické náročnosti výroby piva a posoudit možnost využití tepelného čerpadla k jejímu snížení.

Seznam doporučené literatury:

BASAŘOVÁ, Gabriela, Jan ŠAVEL, Petr BASAŘ a Tomáš LEJSEK, 2010. Pivovarství: Teorie a praxe výroby piva. Praha: VŠCHT Praha. ISBN 978-80-7080-734-7.

KOSAŘ, Karel, 2000. Technologie výroby sladu a piva. Praha: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský. ISBN 80-902658-6-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá problematikou energetické náročnosti výroby piva. První část je zaměřena na samotnou technologii výroby piva, jejíž pochopení je stěžejním předpokladem pro posouzení možnosti využití tepelného čerpadla. Hlavní část popisuje jednotlivé procesy a jejich energetickou náročnost. V závěru je provedeno zhodnocení využití tepelného čerpadla, které by mohlo snížit energetickou náročnost výroby piva.

Klíčová slova

Výroba piva, pivo, energetická náročnost, teplo, tepelné čerpadlo

Abstrakt

The bachelor thesis deals with the issue of energy consumption of beer production. The first part focuses on the technology of beer production itself, the understanding of which is a key prerequisite for assessing the possibility of using a heat pump for this process. The main part then describes the individual processes and their energy consumption. Finally, it evaluates the use of a heat pump and shows if it could reduce the energy requirements of beer production.

Keywords

Beer production, beer, energy consumption, heat, heat pump

Bibliografická citace

MAŤA, Jakub. *Energetická náročnost výroby piva*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133289>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jiří Hejčík.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Hejčíka, PhD. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně 20. května 2021

.....

Jakub Mat'a

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu, panu Ing. Jiřímu Hejčíkovi, PhD. za jeho odborné vedení, rady a připomínky během vypracovávání této bakalářské práce.

Dále bych také rád poděkoval mé rodině a svým blízkým, kteří při mně stáli a podporovali mě během celého dosavadního studia.

Obsah

Úvod.....	11
1. Výroba piva.....	12
1.1 Historie piva	12
1.2 Suroviny pro výrobu piva.....	12
1.2.1 Voda.....	12
1.2.2 Chmel.....	14
1.2.3 Slad	15
1.2.4 Pivovarské kvasinky	15
1.3 Rozdělení piva.....	15
1.4 Proces výroby piva	16
1.4.1 Čištění sladu.....	16
1.4.2 Kondicionování sladu	17
1.4.3 Šrotování	17
1.4.4 Sypání na várku.....	17
1.4.5 Vystírání.....	17
1.4.6 Rmutování.....	18
1.4.7 Scezování sladiny a vyslazování mláta.....	19
1.4.8 Chmelovar.....	19
1.4.9 Separace hrubých kalů	19
1.4.10 Chlazení mladiny	19
1.4.11 Separace jemných kalů	20
1.4.12 Kvašení mladiny a dokvašování piva	20
1.4.13 Mikrobiologická kontrola	21
1.4.14 Filtrace piva	22
1.4.15 Trvanlivost a úprava piva před stáčením	22
2. Energetická náročnost ve vybraných úsecích výroby	23
2.1 Návrh pivního designu	23
2.1.1 Výpočty základních parametrů	25
2.2 Teplá strana	26
2.2.1 Vystírka a zapárka.....	26
2.2.2 Rmutování.....	28
2.2.3 Vyslazování.....	33
2.2.4 Chmelovar.....	34
2.3 Studená strana	36
2.3.1 Chlazení mladiny	36

2.3.2	Hlavní kvašení	39
2.3.3	Zchlazení do ležáckých sklepů	40
2.4	Celková potřeba energie	42
3.	Tepelné čerpadlo	43
3.1	Základní charakteristika	43
3.2	Využití při výrobě piva	44
	Závěr	46
	Zdroje	47
	Seznam použitých zkratk a symbolů	48
	Seznam příloh	53

Úvod

Výroba piva v České republice má dlouholetou tradici a již mnoho let patříme k předním výrobcům a vývozcům piva v Evropě. Za poslední léta navíc dochází k dalšímu rozšiřování a zakládání domácích pivovarů a minipivovarů. Výroba piva je technologicky náročný proces na čas, kde důležitou roli hraje přesnost jednotlivých kroků výroby ve vztahu k velkým energetickým potřebám na výrobu chladu a tepla. Podobně, jako u ostatních průmyslových odvětví a výrobních procesů, je snahou i zde, proces výroby piva co nejvíce automatizovat a současně snížit výrobní a provozní náklady. Vzhledem k tomu, že výroba piva je energeticky náročná záležitost v čase, nabízí se otázka, zdali by nebylo vhodné využít technologii tepelného čerpadla na snížení těchto výrobních nákladů. Velkou výhodou tepelných čerpadel jsou nízké provozní náklady, bezobslužnost a především ekologický aspekt výroby energie, na který je a v budoucnosti i nadále bude, kladen velký důraz. Naopak, nevýhodou tepelných čerpadel jsou její vyšší pořizovací náklady a teplota topné vody, kterou je tepelné čerpadlo schopné vyrobit.

Jak je dnes již známo, tepelná čerpadla vyrábějí energii z okolního prostředí a převádí ji na teplo nebo chlad. Je tedy otázkou, zdalipak by nebylo vhodné využít tepelného čerpadla při procesu chlazení piva k určité rekuperaci tepelné energie, za účelem snížení energetické náročnosti při vaření piva.

Cílem bakalářské práce je určit energetickou náročnost jednotlivých výrobních procesů výroby piva a následně zvážit využití tepelného čerpadla, vzhledem k rekuperaci tepelné energie pro výrobní procesy náročné na ohřev.

1. Výroba piva

Pivo je slabý alkoholický nápoj, který se vyrábí z obilných sladů, vody a chmele, za účasti pivovarských kvasinek. Mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří pěnivost, čírost, barva, chuť a vůně. Jeho chemické složení se mění podle druhu piva, a také dochází k rozdílům v rámci jednoho druhu, vlivem kolísání mezi jednotlivými várkami. Výroba piva by se dala rozdělit do tří hlavních procesů – sladování, výroba sladiny („vaření piva“) a kvašení. V některých zemích dochází k využívání cukernaté a škrobnaté náhražky sladu, za účelem snížení výrobních nákladů [1, 2].

1.1 Historie piva

Pivovarství patří mezi velmi staré a známe řemeslo. Za kolébkou se zpravidla považuje období Mezopotámie (7000 př. n. l.), oblast mezi řekami Eufrat a Tigris, osídlenou Sumery. Zhruba 3000 let před naším letopočtem došlo ke vzniku kvašeného nápoje zvaného „kaš“ a později nápoje s názvem „šikarum“ připravovaného Babyloňany. Základem byl rozlámaný chléb, který se zalil vodou a nechal zkvasit. Staří Římané neměli pivo zvláště v oblibě, přesto však jeden z nejslavnějších Římanů Gaius Julius Caesar nazval pivo „váženým a mocným nápojem“ [1, 3].

Samotná výroba piva, která se rozvíjela od velmi primitivních postupů, zažila obrovský rozmach na konci 18. století, kdy došlo k velkým pokrokům v poznání chemických, fyzikálních a biochemických procesů během výroby piva, která změnila toto odvětví na průmyslovou výrobu, jakou ji známe dnes. V té době české pivovarství velmi prosperovalo. Docházelo k vývozu kvalitních surovin a k produkci piva specifických vlastností.

První zpráva o výrobě piva u nás se váže s letopočtem 993 k Břevnovskému klášteru. Nejstarším dokladem o pěstování chmele na našem území je nadační listina Břetislava I. Pivovarníci v podhradí museli podle listiny knížete Soběslava I. platit desátek, původně desátý díl chmele; tato povinnost platit církvi byla zrušena v Čechách až roku 1848 [3].

Po druhé světové válce dochází v naší zemi k stagnaci rozvoje a modernizace pivovarství, z důvodu soustředění se na těžký průmysl. Přestože pracovníci v oboru vykonávali práci na zastaralých zařízeních, výroba českého piva nadále prosperovala a nezaostávala za konkurencí. Po ukončení socialistického období v roce 1989, došlo k velkému rozvoji a modernizaci tehdejších pivovarů, kde i nadále byla zachována kvalita českého piva [1].

1.2 Suroviny pro výrobu piva

Mezi základní suroviny potřebné pro výrobu piva patří slad, voda, chmel a pivovarské kvasinky.

1.2.1 Voda

Voda je jednou ze základních surovin potřebných pro výrobu piva a její složení má velký vliv na konečný produkt. Pivovarství patří mezi průmyslová odvětví s největší spotřebou vody, jelikož voda představuje 75 až 80 % hmotnosti. Zdrojem přírodní vody pro pivovary jsou vody spodní a povrchové. Mezi vody spodní patří vody pramenité a studniční – mají nízký obsah organických látek, vyšší obsah iontů, rozpuštěné plyny a nižší obsah mikroorganismů. Mezi vody povrchové patří vody říční, z údolních přehrad, rybníční a jezerní – obsahují zákal (tvořeny částicemi nerozpustných zemin), rozpuštěné a koloidní látky organického a anorganického původu, řasy, vyšší obsah mikroorganismů a rozpuštěné plyny [1, 4].

Jedním z hlavních faktorů ovlivňující kvalitu vody, je její tvrdost. Tvrdost vody vyjadřuje obsah iontů kovů alkalických zemin, převážně Ca^{2+} a Mg^{2+} . U nás se k vyjadřování

tvrdosti vody používaly tzv. „německé stupně“, ty byly později nahrazeny jednotkou milival na litr. Avšak nová soustava jednotek SI obě tyto metody nepřipouští a zavádí jednotku milimol na litr. V tabulce 1 jsou uvedeny převodní vztahy mezi jednotlivými způsoby vyjadřování tvrdosti vody [4].

Tab. 1 Převodní tabulka pro různé vyjádření tvrdosti [4].

	mmol.l ⁻¹	mval.l ⁻¹	stupeň němec.	stupeň angl.	stupeň franc.
mmol.l ⁻¹	1	2	5,6	7,0	10,0
1 mval.l ⁻¹	0,5	1	2,8	3,5	5,0
1 stupeň německý	0,179	0,357	1	1,25	1,79
1 stupeň anglický	0,143	0,286	0,8	1	1,43
1 stupeň francouzský	0,1	0,2	0,56	0,7	1

Definice jednotlivých stupňů tvrdosti:

1 stupeň německý = 10 mg CaO na 1 litr vody
 1 stupeň anglický = 1 grain (0,065 g) CaCO₃ na gal-
 lon (4,544 l), tj. 14,3 mg CaCO₃ na 1 l vody
 1 stupeň francouzský = 10 mg CaCO₃ na 1 litr vody
 V USA se často používá jednotky ppm CaCO₃, tj.
 0,1 franc. stupně.

Z hlediska tvrdosti dělíme vodu na:

- a) Měkkou – < 1,3 mmol.l⁻¹
- b) Středně tvrdou – 1,3 – 2,5 mmol.l⁻¹
- c) Tvrdou – 2,5 – 3,8 mmol.l⁻¹
- d) Velmi tvrdou – > 3,8 mmol.l⁻¹

dále také pak na karbonátovou (přechodnou) a nekarbonátovou (trvalou). V tabulce 2 jsou uvedeny vztahy pro výpočet tvrdosti na základě chemického rozboru [1].

Tab. 2 Výpočet tvrdosti vody z chemického rozboru [4].

Tvrdost			
mg.l ⁻¹	mmol.l ⁻¹	mval.l ⁻¹	stupeň němec.
„Vápenatá“ tvrdost a	a.0,0250	a.0,0499	a.0,1399
„Hořečnatá“ tvrdost b	b.0,0411	b.0,0822	b.0,2306
Celková tvrdost d d = a + b	a.0,0250 + b.0,0411	a.0,0499 + b.0,0822	a.0,1399 + b.0,2306
a – obsah Ca ²⁺ [mg.l ⁻¹] b – obsah Mg ²⁺ [mg.l ⁻¹]			

Vodu podle účelu využití dále dělíme na [1]:

1. **Varní vodu**, která se používá při přípravě mladiny a musí splňovat parametry pitné vody. Proto dochází k úpravám jak spodních, tak povrchových vod. Spodní (povrchové) vody často obsahují Fe²⁺ a Mn²⁺, někdy též rozpuštěný CO₂. Úprava povrchových vod je při současném stavu znečištění prostředí komplikovanější a sestává se z více postupů – jako odstranění tuhých nečistot, koagulace (odstraňování koloidních a barevných látek), sedimentace, filtrace a mikrobiologické zajištění. Fyzikálně-chemické a biologické vlastnosti dané vody mají vliv na celkový průběh přípravy, kvalitu a i na specifické vlastnosti určitého typu piva.

2. **Mycí a sterilační vodu**, která musí být prostá mikroorganismů, chemických kontaminantů a nesmí zapáchat.
3. **Provozní vodu**, která musí odpovídat standardům stanoveným pro jednotlivé provozní operace. Využívá se pro přípravu mycích roztoků a výplachy zařízení.

1.2.2 Chmel

Chmel je jedna ze čtyř základních pivovarských surovin. Jedná se o dvoudomou rostlinu, v tomto odvětví se zpracovává pouze samičí, řazenou do čeledě rostlin konopovitých. V současnosti se nejčastěji pěstuje chmel evropský, který je poddruhem chmele otáčivého. Ostatní druhy chmele se využívají ke šlechtění nových druhů, za účelem zlepšení technologických vlastností. Mezi jeho nejdůležitější složky patří chmelová pryskyřice, silice a polyfenoly. Právě sloučeniny chmelové pryskyřice ovlivňují jeho hořkost, nejvíce pak α -hořké kyseliny.

Chmel je rostlina náročná na teplo, světlo, vláhu a kvalitu půdy. Všechny tyto parametry ovlivňují jeho kvalitu. Pro pivovarskou kvalitu je rozhodující jeho posklizňové zpracování a skladování. Chmelové pryskyřice a silice jsou látky, které se snadno oxidují, štěpí a vzájemně reagují. Jedná se o nepříznivé reakce, kterým se snažíme předejít. Proto se chmel před samotným zpracováním v pivovaru skladuje za co nejnižších teplot.

Podle zabarvení chmelové révy dělíme odrůdy chmele na červeňáky, typické pro Evropu (i Českou republiku) a na zeleňáky, typické pro Anglii a zámoří. Dále můžeme chmel dělit podle doby jeho zrání, a to na rané, polorané a pozdní. V poslední řadě se taky dělí podle obsahu chmelových pryskyřic na jemné aromatické chmele (obsah α -hořkých kyselin 3 až 7 % hmotnosti) a na vysokoobsažné hořké chmele (obsah α -hořkých kyselin až 15 % hmotnosti) [1, 4].

Pro naši republiku je nejtypičtější odrůdou žatecký poloraný červeňák (obr. 1). V České republice je pěstování chmele kontrolováno a řízeno. Jsou zde povoleny tři oblasti pro jeho pěstování – Žatecko, Úštěcko a Tršicko [4].



Obr. 1 Žatecký poloraný červeňák [5].

1.2.3 Slad

Slad vzniká naklíčením a následným usušením obilného zrna. Pro pivovarský průmysl je nejrozšířenější surovinou ječmen. V malé míře se také používá pšenice, kukuřice a rýže. Cílem je přeměnit ječmen na slad bohatý na enzymy a na extrakt, a to za minimálních nákladů.

Do konce 17. století se pro speciální piva používal i oves setý, jehož používání vymizelo zásluhou reformátora českého pivovarství Františka Ondřeje Poupěte. U nás i v Evropě, a to od začátku 18. století, převládala výroba z ječmene, snižovala se výroba z pšenice. S nástupem průmyslové výroby v 19. století, se výroba sladu přesunula do samostatných sladoven. Ty potom prodávaly slad domácím pivovarům, ale docházelo i k jeho vývozu za hranice [1].

Vegetační doba jarního ječmene v našich podmínkách trvá v průměru 100 až 120 dní. Jednotlivé druhy sladů se získávají úpravami daných technologických procesů, díky nimž je možno regulovat aktivaci a syntézu enzymů (požadované rozluštění) a zastavit životní a luštící pochody v zrně (tvorba aromatických a barevných látek). V celém světě převládá výroba světlých sladů plzeňského typu (světlé pivo) a tmavých sladů mnichovského typu (tmavé pivo). Další, ne tak časté typy sladů, se uplatňují při výrobě piv odlišných vlastností [4].

Některé pivovary z ekonomických důvodů, či s cílem dosáhnout specifických vlastností piva (bezlepkové pivo aj.), využívají sladových náhražek v podobě škrobových nebo cukernatých surogátů. Tyto náhražky mohou v určité míře zastoupit ječný slad a snížit tak náklady o zhruba 13 %. Mezi tyto náhražky patří například: nesladové obiloviny, škrobnaté výluhy, sirupy a koncentráty, speciální sladové náhražky, cukernaté náhražky aj. [4].

1.2.4 Pivovarské kvasinky

Jedná se o jednobuněčné organismy, používané pro výrobu alkoholických nápojů jak v průmyslové, tak i domácí výrobě. Kvasinky rozdělujeme na dva druhy, na spodní a svrchní. Svrchní se používají při výrobě piv typů „ale“, „porter“ aj., zatímco spodní se používají pro piva plzeňského typu (ležáky). Tyto dva typy se od sebe liší ve složení genetického materiálu, rozdílném složení buněčných stěn, stupni zkvašování α -rafinosy, tepelné odolnosti aj. Nejpoužívanější druh pro spodní kvašení je *Saccharomyces cerevisiae* subsp. *Uvarum carlsbergensis* a pro svrchní kvašení je to potom druh *Saccharomyces cerevisiae* subsp. *Cerevisiae* [4].

Jejich metabolismus – látková výměna – je proces, kdy přidáváme kvasinky do mladiny za účelem přeměny zkvasitelných cukrů na alkohol a CO_2 , za účasti řady enzymů a koenzymů. Metabolismus kvasinek souvisí i s mnoha dalšími složkami mladiny, kde dochází ke vzniku velkého spektra vedlejších produktů, které ovlivňují charakter hotového piva [1, 4].

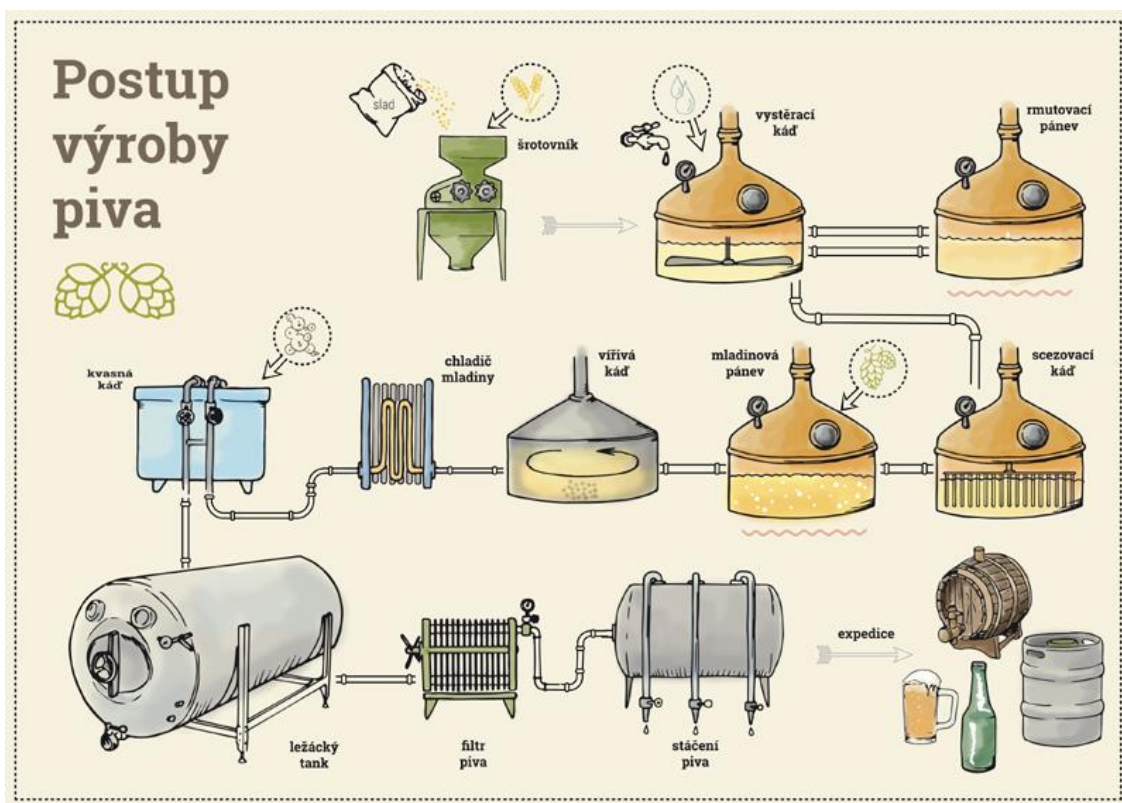
1.3 Rozdělení piva

V současnosti se ve světě vyrábí nespočet druhů piv se specifickými vlastnostmi. U nás se výroba piv dá dělit podle určitých faktorů [1, 4]:

- **Podle způsobu kvašení:**
 - Piva spodně kvašená (kvasnice postupně klesají ke dnu)
 - Piva svrchně kvašená (kvasnice jsou na konci kvašení vynášeny k povrchu)
 - Piva spontánně kvašená
- **Podle barvy**
 - Světlá
 - Tmavá
 - Polotmavá
 - Řezaná

- **Podle obsahu původního extraktu mladiny (podle potravinářského zákona):**
 - Lehká piva (do 7,99 % extraktu původní mladiny)
 - Výčepní piva (8,00 – 10,99 % extraktu)
 - Ležáky (11,00 – 12,99 % extraktu)
 - Speciální piva (nad 13,00 % extraktu)
 - Portery – tmavá piva (minimálně 18 % extraktu)
 - Piva se sníženým obsahem alkoholu (obsah alkoholu nejvýše 1,2 % obj.)
 - Nealkoholická piva (obsah alkoholu nejvýše 0,5 % obj.)
 - Piva se sníženým obsahem cukrů (nejvýše 7,5 g·l⁻¹ sacharidů a 4,0 g·l⁻¹ bílkovin)
 - Pšeničná piva (podíl pšeničného extraktu minimálně 1/3 z celkového extraktu)
 - Kvasnicová piva (dodatečné přidání malého množství rozkvašené mladiny do hotového piva v průběhu stáčení)
 - Bylinná piva (přídavek částí bylin, dřevin nebo jejich extraktů)

1.4 Proces výroby piva



Obr. 2 Postup výroby piva [6].

1.4.1 Čištění sladu

Dochází zde k oddělování mechanických nečistot včetně kovových příměsí a prachu. K čištění se využívá dva samostatné stroje – čistička a odkaménkovač. Funkcí čističky je oddělit hrubé i drobné nečistoty, prach a kovové částice. V odkaménkovači dochází k oddělování zrněk písku a kaménků od sladového zrna na základě jejich rozdílné měrné hmotnosti [4].

1.4.2 Kondicionování sladu

Proces při kterém dochází ke zvlhčení pluchy (obalová část) sladového zrna. Kondicionovaný šrot vykazuje o 20 % vyšší objem pluch a nižší podíl hrubé krupice. Na základě této úpravy můžeme zkrátit scezování, nebo zvýšit zatížení scezovacího dna. Díky tomu dochází ke zvýšení varního výtěžku, klesá barva a zjemňuje se chuť piva. Dříve docházelo k používání páry, to však mělo za následek poškození enzymatické aktivity sladu a zvýšení nákladů. Dnes se proto využívání kondicionování ohřátou vodou, případně se může kondicionovat máčením [4].

1.4.3 Šrotování

Jedná se čistě o mechanický proces, při kterém dochází k rozdrčení sladového zrna, za účelem vymletí jeho endospermu, a přitom co nejméně poškodit celistvost pluch. Zachování celistvosti pluch je důležité pro vytvoření filtrační přepážky při scezování a vyslazování mláta. V případě, že dojde k většímu poškození pluch, dochází ke zhoršení barvy sladiny, charakteru hořkosti, celkového chuťového profilu a senzorické stability piva.

Části sladového zrna nejsou stejnoměrně rozluštěné. Při sladování se nejvíce luští endospermální část, která přináší hlavní podíl extraktu, a nejméně pak špička zrna. Špatně rozluštěné slady způsobují menší výtěžek extraktu a problémy při následujících procesech. Jde tomu však v určité míře předejít, a to buď jemnějším mletím, anebo opakovaným šrotováním [1, 4].

1.4.4 Sypání na várku

Jedná se o rozpis surovin, které dáváme na várku. Z hmotnosti a extraktivnosti jednotlivých složek se vypočítá extrakt vložený na várku a následně se porovná s extraktem získaným v mladině. Při výrobě mladiny se kromě základního sladu a chmele používají různé doplňky, díky kterým lze upravovat pH, barvu a podporovat enzymové aktivity sladu [4].

1.4.5 Vystírání

Proces, při kterém dochází k míšení sladu s vodou ve vystírací kádi. Cílem je převést do roztoku co největší množství rozpustných látek. Množství těchto látek závisí na předchozím kroku – sypání, a na objemu vody v hlavním nálevu, tj. množství vody, které se smíchá se sladovým šrotem. Nejčastěji bývá hlavní nálev rozdělen na dva podíly. První část nálevu má teplotu příslušného postupu vystírání, druhá část nálevu je horká voda, kterou se provádí zapárka (přidání vody o teplotě zhruba 80 °C, které způsobí zvýšení teploty vystírky zhruba na 52 °C). Vystírání, jako takové, probíhá třemi způsoby [1]:

- Studené vystírání (teplota vody pod 20 °C) – tento postup se hlavně využívá v případě, že máme špatně rozluštěný slad a počítáme s delší dobou uvolňování dusíkatých látek
- Teplé vystírání (teplota vody 35 až 38 °C) – typické pro výrobu českých piv, předpokladem je dobře rozluštěný slad
- Horké vystírání (teplota vody 50 až 62 °C) – postup vhodný za předpokladu, že máme přelouštěný slad, dochází k degradaci dusíkatých složek

U světlých piv se využívá většího nálevu, z důvodu řidšího rmutu, díky kterému dochází k urychlení enzymových reakcí. Pro tmavá piva se naopak volí menší množství nálevu, aby se docílilo hustšího rmutu. Tento proces má za následek delší dobu působení enzymů. Dochází k většímu převodu látek z pluch, ke karamelizaci cukrů a k zvýšení barvy [1, 4].

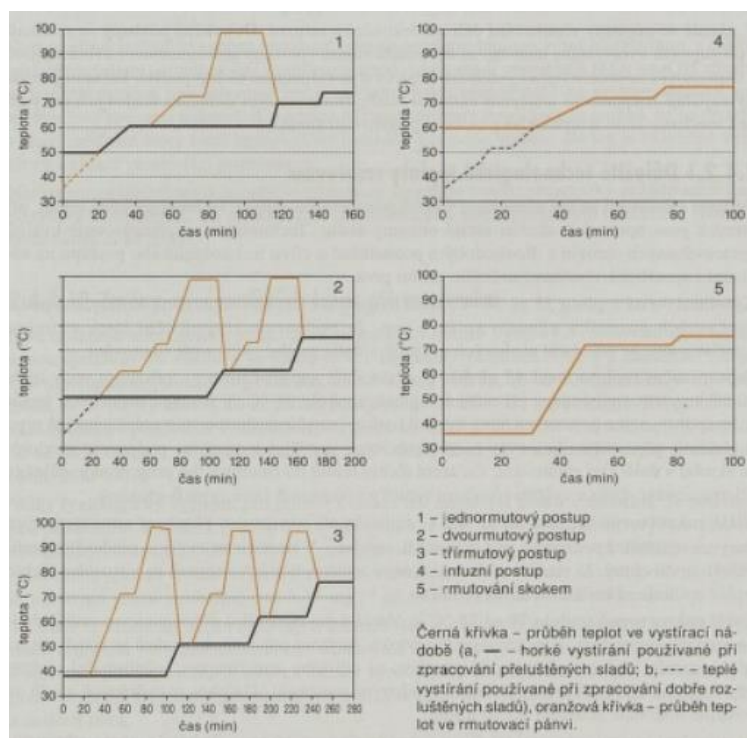
1.4.6 Rmutování

Cílem tohoto procesu je převést veškerý škrob a vhodný podíl dalších látek extraktu do roztoku. Tento proces se provádí z toho důvodu, jelikož většina vysokomolekulárních látek není ve vodě přímo rozpustná (pouhé míchání a zvýšení teploty), a proto dochází k používání sladových enzymů. Rmutování ovlivňuje několik faktorů, jako např.: kvalita sladu, složení sypání, jemnost a podmínky rmutování (pH, teplota aj.) [1, 4].

Působením β -amylasy (enzym) dochází ke štěpení amylosy za vzniku maltosy (sladový cukr). Největší podíl maltosy vzniká při nižší cukrotravné teplotě (62 až 64 °C). Během nárůstu teploty na vyšší cukrotravnou teplotu (72 až 75 °C), dochází k nahrazení působení β -amylasy α -amylasou, která způsobuje zcukření. Po zcukření je možné rmut ohřát na teplotu varu, kde dochází k docukření škrobu, přičemž objem rmutu volíme tak, aby se po jeho vrácení dosáhlo odrmutovací teploty (72 až 78 °C) [4].

Podle kvality rozluštěných sladů volíme z různých postupů rmutování (obr. 3):

- Infuzní rmutování – jedná se o nejjednodušší postup, u kterého je zapotřebí pouze jediná ohřívací nádoba, postup vhodný pro velmi dobře rozluštěné slady
- Rmutování skokem – dochází k zapaření vystírky vroucí vodou přímo na vyšší cukrotravnou teplotu, postup vhodný pro výrobu speciálních piv s nízkým obsahem alkoholu
- Dekokční rmutování – postup, u kterého po vystření dochází k oddělení rmutu, který se samostatně zpracuje, povaří, a následně je pak vrácen do vystírací pánve
 - Jednarmutový postup – vhodný pro dobře rozluštěné slady
 - Dvourmutový postup – vhodný pro středně rozluštěné slady, typický pro výrobu světlých piv plzeňského typu
 - Třírmutový postup – používá se převážně pro hůře rozluštěné slady a k výrobě tmavých speciálních piv [1, 4]



Obr. 3 Rmutovací postupy [7].

1.4.7 Scezování sladiny a vyslazování mláta

Jedná se především o fyzikální proces ve scezovací kádi. V první fázi dochází k oddělování hlavního podílu sladiny (předku) od zbytků sladového šrotu a mláta. Následuje proces vyslazení (promytí horkou vodou) mláta, kde dochází k získání výstřelků (zředěná sladina). Nakonec dochází ke spojení předku s výstřelky, což nám dává celkový objem sladiny. Cílem tohoto procesu je získat čistou sladinu a co největší množství extraktu [4].

1.4.8 Chmelovar

V mladinové pánvi dochází k vaření sladiny s chmelem, kde výsledným produktem je mladina. Průměrná doba vaření se pohybuje od 65 do 120 minut, v závislosti na typu chmelovaru s postupným přidáváním chmele. Během tohoto procesu dochází k:

- odpařování přebytečné vody a těkavých látek – ovlivňuje energetickou náročnost a kvalitu
- inaktivaci enzymů a sterilizaci mladiny – stabilizování mladiny
- pokles pH a nárůst barvy – pokles pH ovlivňuje koagulaci bílkovin
- koagulace bílkovin a tvorba lomu – jeden z nejdůležitějších pochodů při chmelovaru, tento proces je indikátorem správného průběhu chmelovaru
- tvorba produktů tepelného rozkladu – při zvyšování tepelného zatížení dochází ke zvyšování koncentrace látek, označovaných jako produkty Maillardovy reakce. Tyto látky jsou prekurzory staré chuti piva, a proto je potřeba tepelné zatížení monitorovat
- tvorba redukujících látek – tyto látky (vznikající při chmelovaru), váží kyslík a chrání tak složky extraktu proti oxidaci
- reakce jednotlivých účinných složek chmele s mladinou – mladina získává hořkou chuť a chmelové aroma [1, 4]

1.4.9 Separace hrubých kalů

Hrubý kal, který je tvořený vločkami vznikajícími při chmelovaru, je nutné v co největším množství úplně odstranit z mladiny. Tyto částice totiž zanášejí povrch kvasničných buněk a zhoršují čirost a filtrovatelnost piva. V případě, že nedojde k oddělení těchto částic, pivo může vykazovat hrubou hořkost, kalovou chuť a špatnou pěnivost. Velikost těchto částic se pohybuje v rozmezí od 30 do 80 μm , přičemž zbytkový obsah hrubého kalu v mladině by neměl přesahovat hodnotu 100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. K oddělování hrubých kalů slouží chladicí štoky, usazovací kád', vířivá kád', sběrače kalů a odstředivky [4].

1.4.10 Chlazení mladiny

Cílem tohoto procesu je co nejrychleji ochladit horkou mladinu z vířivé kádě na tzv. „zákvasnou teplotu“ (6 až 9 °C). Dříve se používaly sprchové chladiče, kterými se mladina z usazovacích kádí, popřípadě štoků o teplotě 50 až 60 °C, ochlazovala a zároveň i provzdušňovala. V dnešní době se už převážně používají deskové chladiče, které ochlazují mladinu o teplotě téměř 100 °C [1, 4].

1.4.11 Separace jemných kalů

Během chlazení, při poklesu teplot pod 80 °C, kdy se čirá mladina začíná postupně zakalovat, dochází k oddělování jemného kalu. Velikost těchto částic se pohybuje v rozmezí 0,5 až 1 μm. Na rozdíl od hrubých kalů, se u jemných kalů doporučuje pouhá redukce jejich obsahu. V případě, že dojde k příliš velké redukci těchto částic, pivo nabývá prázdne chuti, dochází k pomalejšímu kvašení a je nutné intenzivnější provzdušnění mladiny. Proto se pro optimální kvašení doporučuje 120 až 160 mg·l⁻¹ jemných kalů, díky kterým pivo nabývá typické chuti, hořkosti a pěnivosti [4].

1.4.12 Kvašení mladiny a dokvašování piva

Jedná se o proces, ve kterém v první části dochází k hlavnímu kvašení, kde dochází ke zkvašení většinového množství cukernatých látek mladiny pivovarskými kvasinkami za vzniku alkoholu (ethanolu), oxidu uhličitého, biomasy a vedlejších metabolismů. V druhé fázi dochází k dokvašování za mírného tlaku a při nízkých teplotách, kde dochází k dokvašování zbylého extraktu kvasnicemi. Cílem dokvašování je dosáhnout optimálních vlastností, nasycení oxidem uhličitým a vyčištění.

Do poloviny 19. století se převážně používaly svrchní kvasinky, které jsou na konci kvašení vynášeny na povrch mladiny. Naproti tomu, spodní kvasinky se na konci kvašení usazují u dna kvasných nádob, z důvodu rozdílného složení buněčných stěn. V dnešní době se využívá obou druhů kvasinek. Spodní jsou typické pro piva plzeňského typu a svrchní pro piva typů „ale“, „porter“ aj.

Během hlavního kvašení dochází, jak již bylo zmíněno, ke vzniku vedlejších metabolismů. Tyto metabolismy jsou však tvořeny jak pozitivními (estery, alkoholy, mastné kyseliny apod.), tak i negativními (aldehydy, sirné sloučeniny apod.) složkami.

Doba hlavního kvašení se pohybuje mezi 7 až 12 dny v závislosti na koncentraci původní mladiny, teplotě kvašení a typu kvasinek. Dokvašování probíhá v ležáckých nádobách (tancích) v rozmezí 1 až 10 týdnů. Avšak při tradičním dokvašování to obvykle bývá 21 dnů pro 10% výčepní piva a 70 dnů do 12% ležáky.

Mezi hlavní faktory ovlivňující průběh hlavního kvašení patří:

- Složení mladiny – mladina musí obsahovat dostatek zkvasitelných látek, nesmí obsahovat velké množství dusičnanů a zdraví škodlivých látek a kontaminující mikroorganismy
- Teplota – podle druhu použitých kvasinek, zvyšování teploty způsobuje zhoršení trvanlivosti pěny, barvy piva, ztrátu hořkých látek aj.
- Kmen a dávka kvasinek – ovlivňuje průběh kvašení a kvalitu piva
- Nasycení zakvašované mladiny kyslíkem – důležité pro pomnožení kvasničných buněk [1, 4]



Obr. 4 Spilka pivovaru Svijany [8].

1.4.13 Mikrobiologická kontrola

Cílem mikrobiologické kontroly je odhalit místa, kde dochází k pronikání kontaminace. Pivo, jako takové, není vhodným místem k růstu mikroorganismů, vzhledem k obsahu alkoholu, nízkému pH, anaerobní atmosféře, chmelovým látkám a postupně klesajícímu obsahu zkvasitelných cukrů. Přesto však dochází k výskytu mikroorganismů. Část těchto mikroorganismů odumírá, některé jsou tepelně rezistentní. Jedná se převážně o bakterie vytvářející bacily, proto dochází k ošetřování piva krátkodobým, šetrným ohřevem, popřípadě pasterizací v láhvích.

Mezi základní postupy kontroly patří:

- Sledování trvanlivosti piva v lahvi – posuzování škodlivé kontaminace na konkrétním produktu, jedná se o zdoluhavou a neselektivní metodu
- Očkovací metody – používání testovacích médií jako agar, bujón a koncentrát na bázi NBB; tyto média jsou výhodné z hlediska nákladů, rychlosti i jistoty důkazů
- Rychlometody – cílem těchto metod je přinést výsledek v takovém časovém úseku, díky kterému je možné provést nápravu [4]

1.4.14 Filtrace piva

Filtrace je proces, kdy dochází k protékání piva přes filtrační přepážku, na které se zachycují tuhé částice. Na filtrační přepážku se nanáší filtrační materiál (křemelina), který postupně tvoří filtrační vrstvu, neboli filtrační koláč. Tam dochází k hromadění tuhých částic, které se stávají jeho součástí, zmenšují póry a snižují rychlost průtoku. Cílem je upravit pivo tak, aby nedošlo ke ztrátě jeho vlastností během doby jeho skladování.

K filtraci se dříve využívali masové filtry, které fungovaly na principu filtračního koláče. Na filtrační přepážku, vyrobenou z bavlny a celulosy, se přidávalo 1 % azbestu pro lepší adsorpční vlastnosti. Tento způsob filtrace piva se přestal používat z důvodu vysoké pracnosti, nízké produktivity a neustálého přísunu azbestu, který byl zdravotníky zakázán. V dnešní době se nejvíce uplatňuje využívání naplavovacích filtrů (deskový, svíčkový a síťový), které fungují na principu naplavování přes samotnou filtraci. Naplavování, které provádíme hrubou křemelinou s vodou, slouží k upravování hustoty pórů [1, 4].

1.4.15 Trvanlivost a úprava piva před stáčením

Dříve nebylo pivo nutné nikterak upravovat, co se týče jeho trvanlivosti. Pivo, vyrobené přímo v hospodě, se čerstvé natočilo z ležáckého sudu a vypilo. V dnešní době je však už předpokladem a i požadavkem, aby pivo po celou dobu své záruky trvanlivosti, garantovalo biologickou, koloidní a chuťovou stabilitu (trvanlivost).

Biologickou stabilitou piva se rozumí zamezení množení pivu škodlivých látek. Této stability docílíme hlavně dodržováním čistoty během celé výroby. Dále však této stability docílíme pomocí:

- Pasterizace piva
- Stočením piva za horka
- Studenou sterilizací a aseptickým stáčením do transportního obalu

Cílem koloidní stability piva je zamezit tvorbě sedlin a zákalů, a to i v pivu s dobrou biologickou stabilitou.

I u piva, které má dobrou koloidní i biologickou stabilitu, může docházet k chuťovým změnám, vlivem látek vzniklých oxidací nenasyčených mastných kyselin a produktů Maillardovy reakce. Předejít těmto změnám se dá mnoha způsoby. Samotný kyslík ovlivňuje chuť piva, proto je nutné minimalizovat jeho kontakt s pivem, navíc je třeba se vyvarovat:

- Skladování při vyšších teplotách
- Vibracím
- Vystavování (lahví) přímému světlu [4]

2. Energetická náročnost ve vybraných úsecích výroby

Cílem této bakalářské práce bylo určit minimální množství energie, potřebné pro výrobu piva. Samotná výroba by se dala rozdělit do dvou hlavních energetických částí. Na energetickou část, kde je potřeba ohřevu a na energetickou část, kde je potřeba chlazení.

Mezi procesy energeticky náročné na ohřev patří:

- Vystírání a zapárka
- Rmutování
 - 1. rmut
 - 2. rmut
- Vyslazování
- Chmelovar

Mezi procesy energeticky náročné na chlad patří:

- Chlazení mladiny
- Hlavní kvašení
- Zchlazení do ležáckých sklepů (tanků)

Z hlediska výpočtů energetické náročnosti, nebudou brány v potaz ztráty do okolí, jelikož každý pivovar, ať už domácí nebo průmyslový, používá různé druhy kotlů, varen, izolací atd., což nelze ve výpočtech a následném posouzení zcela objektivně zohlednit.

2.1 Návrh pивního designu

Pro výpočet a následné posouzení energetické náročnosti piva, bylo potřeba spočítat mnoho základních hodnot, které se odvíjely od několika faktorů, jež bylo nutno dopředu stanovit. Při posuzování se vycházelo z níže zvolených parametrů:

- Množství piva
 - $V_{piva} = 60 \text{ l}$
- Stupňovitost
 - Síla piva, vyjádřena v hmotnostních procentech extraktu původní mladiny
 - Pro naše výpočty budeme uvažovat pivo s 12% extraktem původní mladiny (dále jen EPM)
 - $EPM = 12 \text{ hm. \%}$
- Objemová výtrata
 - Vyjadřuje rozdíl mezi objemem horké mladiny a stočeným pivem k výstavu
 - Obvykle se pohybuje mezi 8 až 12 %, přičemž nejnižších hodnot nabývá v případě moderních závodů s velkoobjemovými nádobami a malým výrobním sortimentem
 - Pro náš výpočet budeme uvažovat hodnotu 10 % [4]
 - $V_v = 10 \%$
- Extraktivnost sladu
 - Udává maximální množství extraktu, které jsme schopni extrahovat ze sladu, zjišťuje se laboratorně
 - Pro naše výpočty budeme uvažovat extraktivnost sladu 80 % [9]
 - $E = 80 \%$
- Efektivita varny
 - V případě, že používáme více druhů sladů, je třeba zahrnout extraktivnost každého z nich → efektivita varny
 - $EF_v = 75 \%$ [9]

- Ztráty odparem při chmelovaru
 - Množství odpařené vody vzhledem k objemu sladiny při 100 °C
 - Obvykle se odpar pohybuje okolo 10 % [9]
 - $z_{to} = 10 \%$
- Ztráty v mlátě
 - Jedná se o ztrátu objemu, který ztratíme v mlátě
 - Obvykle to bývá v rozmezí 0,9 – 1 litr na 1 kg sladu [9]
 - $z_{tP} = 1 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{sladu}}^{-1}$
- Ztráty díla v chmelovém mlátě
 - Jedná se o množství mladiny, které ztratíme v chmelovém mlátě
 - Vyjádřena pomocí ztrátového koeficientu $z_{tCH} = 15 \%$, který popisuje množství sladiny, o kterou přijdeme vlivem odparu a ztrát v chmelovém mlátě [9]
 - $V_{CHM} = V_M \cdot z_{tCH} = 10,1 \text{ l}$
- Hustota rmutu
 - Vyjadřuje objem hlavního nálevu vody ve vztahu k hmotnosti použitého sladu
 - Hustota rmutu nám ovlivňuje řadu dějů (vyluhování, zcukření, změna barvy)
 - V případě že máme příliš hustý rmut, dochází k nerovnoměrnému rozložení teploty, v opačném případě dochází nízkému obsahu předku a tím pádem ke snížení výtěžnosti
 - Hustší rmut také způsobuje tmavší barvu piva
 - Jeho hodnota se pohybuje v intervalu $3 - 4 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{sladu}}^{-1}$, podle tymu rmutování, přičemž by neměla klesnout pro hodnotu $2 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{sladu}}^{-1}$
 - Pro naše výpočty budeme uvažovat hodnotu $3,5 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{sladu}}^{-1}$ [9]
 - $HR = 3,5 \text{ l} \cdot \text{kg}_{\text{sladu}}^{-1}$
- Složení sladu
 - $w_{\text{bílkoviny}} = 10,50 \%$
 - $w_{\text{tuk}} = 1,05 \%$
 - $w_{\text{karbohydráty}} = 81,80 \%$
 - $w_{\text{vláknina}} = 4,85 \%$
 - $w_{\text{popel}} = 1,80 \%$
 - $w_{\text{voda}} = 0,00 \%$
- Měrné tepelné kapacity [10]
 - $c_{P\text{protein}} = 2,0082 + 12089 \cdot 10^{-3} \cdot t - 1,3129 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
 - $c_{P\text{tuk}} = 1,9842 + 1,4733 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4,8008 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
 - $c_{P\text{karbohydráty}} = 1,5488 + 1,9625 \cdot 10^{-3} \cdot t - 5,9399 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
 - $c_{P\text{vláknina}} = 1,8459 + 1,8306 \cdot 10^{-3} \cdot t - 4,6509 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
 - $c_{P\text{popel}} = 1,0926 + 1,8896 \cdot 10^{-3} \cdot t - 3,6817 \cdot 10^{-6} \cdot t^2$
- Referenční stav
 - $t = 20 \text{ °C}$
 - $p = 101325 \text{ Pa}$

2.1.1 Výpočty základních parametrů

- **Objem mladiny**

$$V_M = V_{piva} \cdot \frac{1}{0,9} = 66,67 \text{ l} \cong 67 \text{ l} \quad (2.0)$$

- **Hmotnost mladiny**

$$m_M = OG \cdot 0,9982 \cdot V_M = 70,09 \text{ kg} \quad (2.1)$$

- **Původní hustota mladiny**

$$OG = 4 \cdot \frac{P}{1000} + 1 = 4 \cdot \frac{12 \cdot P}{1000} + 1 = 1,05 \quad (2.2)$$

- **Hmotnost extraktu**

$$m_{EXT} = 0,9982 \cdot V_M \cdot OG \cdot \frac{EPM}{100} = 0,9982 \cdot 67 \cdot 1,048 \cdot \frac{12}{100} = 8,41 \text{ kg} \quad (2.3)$$

- **Hmotnost sladu**

$$m_C = \frac{m_{EXT}}{E \cdot EF_V} = \frac{8,41}{0,75 \cdot 0,8} = 14,02 \text{ kg} \quad (2.4)$$

- **Objem sladiny**

$$V_S = \frac{V_M}{1 - zt_{CH}} = \frac{67}{1 - 0,15} = 78,82 \text{ l} \quad (2.5)$$

- **Hmotnost sladiny**

$$m_S = V_S \cdot 0,9982 = 78,68 \text{ kg} \quad (2.6)$$

- **Objem hlavního nálevu**

$$V_{HN} = HR \cdot m_C = 3,5 \cdot 14,018 = 49,06 \text{ l} \quad (2.7)$$

- **Hmotnost hlavního nálevu**

$$m_{HN} = V_{HN} \cdot 0,9982 = 49,063 \cdot 0,9982 = 48,97 \text{ kg} \quad (2.8)$$

- **Objem předku**

$$V_P = V_{HN} - m_C \cdot zt_P = 49,063 - 14,018 \cdot 1 = 35,04 \text{ l} \quad (2.9)$$

- **Hmotnost předku**

$$m_P = V_P \cdot 0,9982 = 35,045 \cdot 0,9982 = 34,98 \text{ kg} \quad (2.10)$$

- **Objem vyslazovací vody**

$$V_{VV} = V_S - V_P = 78,824 - 35,045 = 43,779 \text{ l} \quad (2.11)$$

- **Hmotnost vyslazovací vody**

$$m_{VV} = V_{VV} \cdot 0,9982 = 43,779 \cdot 0,9982 = 43,70 \text{ kg} \quad (2.12)$$

2.2 Teplá strana

2.2.1 Vystírka a zapářka

Jak již bylo zmíněno, při vystírání a zapářce dochází ke smíšení sladového šrotu s vodou. Aby bylo možné spočítat energii potřebnou k vystírce a zapářce, je nutné nejprve spočítat měrné entalpie a měrné tepelné kapacity jednotlivých částí, následně pak spočítat jednotlivé ohřevy a nakonec sečíst jednotlivé energie.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- vstupní teplota vody $t_{Vin} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- vstupní teplota sladu $t_{Sin} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota vystírky $t_v = 37 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota zapářky $t_z = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota přiváděné vody do zapářky $t_{Vz} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Následně byly vypočítány jednotlivé měrné entalpie a měrné tepelné kapacity pomocí tabulek a výpočetního programu excel (viz tabulka 2.1).

Tab.2.1 Měrné entalpie a c_p při vystírání a zapářce.

měrná entalpie vstupní vody h_{vv}	42 118,90	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
měrná entalpie vody při vystírce h_{vpv}	155 078,35	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
měrná entalpie vody při zapářce h_{vpz}	217 781,76	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
měrná entalpie vody do zapářky h_{vdz}	335 055,26	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$
c_p sladu při vstupní teplotě c_{pvs}	1,63	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_p sladu při vystírací teplotě c_{pv}	1,67	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
c_p sladu při zapářce c_{pz}	1,69	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

Dále byly určeny jednotlivé hmotnosti:

- Potřebné množství vystírací vody m_V bylo určeno z celkové hmotnosti nálevu m_{HN} a požadavku na dosažení teploty zapářky $t_z = 52 \text{ }^{\circ}\text{C}$, po smísení objemu vystírky se zapařovací vodu o teplotě $80 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$m_V = \frac{m_{HN} \cdot (h_{vdz} - h_{vpz}) - m_C \cdot (c_{pz} \cdot t_z - c_{pv} \cdot t_v) \cdot 1000}{(h_{vdz} - h_{vpv})}, \quad (2.14)$$

$$m_V = \frac{48,97 \cdot (335055,26 - 217781,76) - 14,02 \cdot (1,69 \cdot 52 - 1,67 \cdot 37) \cdot 1000}{(335055,26 - 155078,35)},$$

$$m_V = 29,88 \text{ kg}.$$

- Potřebné množství vody pro zapáčku m_{vdz}

$$m_{vdz} = m_{HN} - m_V, \quad (2.15)$$

$$m_{vdz} = 48,98 - 29,88,$$

$$m_{vdz} = 19,10 \text{ kg}.$$

Nakonec byly dopočítány jednotlivé energie potřebné k provedení vystírky a zapáčky:

- Energie potřebná pro ohřev vody na vystírací teplotu Q_{vz1}

$$Q_{vz1} = m_V \cdot (h_{vpp} - h_{vv}), \quad (2.16)$$

$$Q_{vz1} = 29,88 \cdot (155078,35 - 42118,90),$$

$$Q_{vz1} \cong 3,375 \text{ MJ},$$

- Energie potřebná pro ohřev sladu na vystírací teplotu Q_{vz2}

$$Q_{vz2} = m_C \cdot (c_{Pv} \cdot t_z - c_{PVS} \cdot t_{Vin}), \quad (2.17)$$

$$Q_{vz2} = 14,018 \cdot (1,67 \cdot 37 - 1,63 \cdot 10),$$

$$Q_{vz2} \cong 0,638 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná pro ohřev vody pro zapáčku Q_{vz3}

$$Q_{vz3} = m_{vdz} \cdot (h_{vdz} - h_{vv}), \quad (2.18)$$

$$Q_{vz3} = 19,10 \cdot (335\,055,26 - 42\,118,90),$$

$$Q_{vz3} \cong 5,595 \text{ MJ}.$$

Celková energie potřebná k realizaci vystírky a zapáčky Q_{vz}

$$Q_{vz} = Q_{vz1} + Q_{vz2} + Q_{vz3}, \quad (2.18)$$

$$Q_{vz} = 3,375 + 0,638 + 5,595,$$

$$Q_{vz} = 9,608 \text{ MJ},$$

$$Q_{vz} = \frac{9,608}{3,6},$$

$$Q_{vz} = 2,67 \text{ kWh}.$$

2.2.2 Rmutování

Cílem tohoto procesu je převést obsah sladového šrotu do varní vody. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.4.7, máme různé způsoby rmutování. Pro naše výpočty bylo uvažováno dvourmutového dekokčního postupu, přičemž energetická náročnost u obou rmutů bylo spočtena zvlášť.

2.2.2.1 1. Rmut

V prvním rmutování dochází k pomalému zahřátí hustého rmutu na nižší cukrotvornou teplotu. Následně dochází k zahřátí na vyšší cukrotvornou teplotu, kde dochází ke zcukření. Nakonec dochází k rychlému zahřátí na teplotu varu, kde se pivo vaří.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- teplota vystírací kádě na začátku 1. rmutování $t_{1rZ} = 52\text{ °C}$
- teplota vystírací kádě na konci 1. rmutování $t_{1rK} = 64,3\text{ °C}$
- nižší cukrotvorná teplota v 1. rmutování $t_{1rN} = 62\text{ °C}$
- vyšší cukrotvorná teplota v 1. rmutování $t_{1rV} = 72\text{ °C}$
- teplota konce 1. rmutování $t_{1rR} = 100\text{ °C}$
- objem 1. rmutu $V_{1r} = 13\text{ l}$
- hustota 1. rmutu $HR_1 = 2\text{ l}\cdot\text{kg}^{-1}_{\text{sladu}}$

Jako první byly vypočítány jednotlivé hmotnosti:

- Množství vody ve rmutu m_{1rV}

$$m_{1rV} = \rho_1 \cdot V_{1r}, \quad (2.19)$$

$$m_{1rV} = \frac{987,117 \cdot 13}{1000},$$

$$m_{1rV} = 12,83\text{ kg}.$$

kde: ρ_1 hustota vody při teplotě na začátku 1. rmutu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]

- Množství sladu ve rmutu m_{1rS}

$$m_{1rS} = \frac{V_{1r}}{HR_1}, \quad (2.20)$$

$$m_{1rS} = \frac{13}{2},$$

$$m_{1rS} = 6,5\text{ kg}.$$

Jako další byly určeny měrné entalpie a měrné tepelné kapacity pomocí tabulek a výpočetního programu excel (viz tabulka 2.2).

Tab. 2.2 Měrné entalpie a c_p 1. rmutu.

měrná entalpie vody na začátku rmutování h_{1rZ}	217 781,76	J·kg ⁻¹
měrná entalpie na konci rmutování h_{1rK}	269 068,80	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při nižší cukrotravné teplotě h_{1rN}	259 619,49	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při vyšší cukrotravné teplotě h_{1rV}	301 503,87	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při teplotě varu h_{1rR}	419 057,73	J·kg ⁻¹
c_p sladu na začátku rmutování c_{p1rZ}	1,69	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu na konci rmutování c_{p1rK}	1,71	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu při nižší cukrotravné teplotě c_{p1rN}	1,70	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu při vyšší cukrotravné teplotě c_{p1rV}	1,71	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu při teplotě varu c_{p1rR}	1,74	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Následně byly spočteny jednotlivé energie potřebné k provedení prvního rmutování:

- Energie potřebná pro ohřev na nižší cukrotravnou teplotu v 1. rmutu Q_{1r1}

$$Q_{1r1} = m_{1rV} \cdot (h_{1rN} - h_{1rZ}) + m_{1rS} \cdot (c_{p1rN} \cdot t_{1rN} - c_{p1rZ} \cdot t_{1rZ}), \quad (2.21)$$

$$Q_{1r1} = 12,83 \cdot (259619,49 - 217781,76) + 6,5 \cdot 1000 \cdot (1,70 \cdot 62 - 1,69 \cdot 52),$$

$$Q_{1r1} = 0,65 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná pro ohřev na vyšší cukrotravnou teplotu v 1. rmutu Q_{1r2}

$$Q_{1r2} = m_{1rV} \cdot (h_{1rV} - h_{1rN}) + m_{1rS} \cdot (c_{p1rV} \cdot t_{1rV} - c_{p1rN} \cdot t_{1rN}), \quad (2.22)$$

$$Q_{1r2} = 12,83 \cdot (301503,87 - 259619,49) + 6,5 \cdot 1000 \cdot (1,71 \cdot 72 - 1,70 \cdot 62),$$

$$Q_{1r2} = 0,65 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu v 1. rmutu Q_{1r3}

$$Q_{1r3} = m_{1rV} \cdot (h_{1rR} - h_{1rV}) + m_{1rS} \cdot (c_{p1rR} \cdot t_{1rR} - c_{p1rV} \cdot t_{1rV}), \quad (2.23)$$

$$Q_{1r3} = 12,83 \cdot (419057,73 - 301503,87) + 6,5 \cdot 1000 \cdot (1,74 \cdot 100 - 1,71 \cdot 72),$$

$$Q_{1r3} = 1,84 \text{ MJ}.$$

Celková energie potřebná k provedení prvního rmutování Q_{1r}

$$Q_{1r} = Q_{1r1} + Q_{1r2} + Q_{1r3}, \quad (2.24)$$

$$Q_{1r} = 0,65 + 0,65 + 1,84,$$

$$Q_{1r} = 3,14 \text{ MJ},$$

$$Q_{1r} = \frac{3,14}{3,6},$$

$$Q_{1r} = 0,87 \text{ kWh}.$$

Nakonec bylo potřeba vypočítat požadované výkony v jednotlivých krocích ohřevu, jelikož rmutování je poměrně časově náročný proces. Během prvního rmutování byl uvažován teplotní růst v daných oblastech následovně:

- Rychlost ohřevu na nižší cukrotrvornou teplotu $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$
 - Rychlost ohřevu na vyšší cukrotrvornou teplotu $0,7 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$
 - Rychlost ohřevu na teplotu varu $1,5 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ [9]
- Výkon potřebný pro ohřev na nižší cukrotrvornou teplotu v 1. rmutu P_{1r1}

$$P_{1r1} = \frac{Q_{1r1}}{\tau_{1r1}}, \quad (2.25)$$

$$P_{1r1} = \frac{651860,60}{\frac{(62 - 52)}{1} \cdot 60},$$

$$P_{1r1} = 1086,43 \text{ W}.$$

kde: τ_{1r1} doba ohřevu na nižší cukrotrvornou teplotu v 1. rmutu [hod]

- Výkon potřebný pro ohřev na vyšší cukrotrvornou teplotu ve 1. rmutu P_{1r2}

$$P_{1r2} = \frac{Q_{1r2}}{\tau_{1r2}}, \quad (2.26)$$

$$P_{1r2} = \frac{653599,95}{\frac{(72 - 62)}{0,7} \cdot 60},$$

$$P_{1r2} = 762,5 \text{ W}.$$

kde: τ_{1r2} doba ohřevu na vyšší cukrotrvornou teplotu v 1. rmutu [hod]

- Výkon potřebný pro ohřev teploty na teplotu varu v 1. rmutu P_{1r3}

$$P_{1r3} = \frac{Q_{1r3}}{\tau_{1r3}}, \quad (2.27)$$

$$P_{1r3} = \frac{1837938,55}{\frac{(100 - 72)}{1,5} \cdot 60},$$

$$P_{1r3} = 1641 \text{ W}.$$

kde: τ_{1r3} doba ohřevu na teplotu varu v 1. rmutu [hod]

2.2.2.2 2. Rmut

V druhém rmutu dochází k navracení prvního rmutu do vystírací kádě, čímž dojde ke zvýšení teploty na zhruba nižší cukrotrvornou teplotu. Následně dojde k oddělení řidšího rmutu do pánve, ten se zahřeje na vyšší cukrotrvornou teplotu. Poté dochází k zahřátí rmutu na teplotu varu a nakonec je oddělený rmut navrácen ke zbytku.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- teplota vystírací kádě na začátku 2. rmutování $t_{2rZ} = 64,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota vystírací kádě na konci 2. rmutování $t_{2rK} = 76,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- vyšší cukrotrvorná teplota v 2. rmutu $t_{2rV} = 72 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota varu v 2. rmutu $t_{2rR} = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- objem 2. rmutu $V_{2r} = 17 \text{ l}$
- hustota 2. rmutu $HR_2 = 4 \text{ l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ sladu}$

Pro výpočet energií byly nejprve vypočteny jednotlivé hmotnosti:

- Hmotnost vody ve rmutu m_{2rV}

$$m_{2rV} = \rho_2 \cdot V_{2r}, \quad (2.28)$$

$$m_{2rV} = \frac{980,95 \cdot 17}{1000},$$

$$m_{2rV} = 16,68 \text{ kg}.$$

- Hmotnost sladu ve rmutu m_{2rS}

$$m_{2rS} = \frac{V_{2r}}{HR_2}, \quad (2.29)$$

$$m_{2rS} = \frac{17}{4},$$

$$m_{2rS} = 4,25 \text{ kg}.$$

kde: ρ_2 hustota vody při teplotě vystírací kádě na začátku 2. rmutu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

Jako další byly určeny měrné entalpie a měrné tepelné kapacity pomocí tabulek a výpočetního programu excel (viz tabulka 2.3).

Tab. 2.3 Měrné entalpie a c_p 2. rmutu.

měrná entalpie vody na začátku rmutování h_{2rZ}	269 068,80	J·kg ⁻¹
měrná entalpie na konci rmutování h_{2rK}	319 544,00	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při vyšší cukrotravné teplotě h_{2rV}	301 503,87	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při teplotě varu h_{2rR}	419 057,73	J·kg ⁻¹
c_p sladu na začátku rmutování c_{p2rZ}	1,71	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu na konci rmutování c_{p2rK}	1,72	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu za vyšší cukrotravné teploty c_{p2rV}	1,71	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sladu při teplotě varu c_{p2rR}	1,74	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Následně byly spočteny jednotlivé energie potřebné k provedení druhého rmutování:

- Energie potřebná pro ohřev na vyšší cukrotravnou teplotu ve 2. rmutu Q_{2r1}

$$Q_{2r1} = m_{2rV} \cdot (h_{2rV} - h_{2rZ}) + m_{2rS} \cdot (c_{p2rV} \cdot t_{2rV} - c_{p2rZ} \cdot t_{2rZ}), \quad (2.30)$$

$$Q_{2r1} = 16,68 \cdot (301503,87 - 269068,80) + 4,25 \cdot 1000 \cdot (1,71 \cdot 72 - 1,71 \cdot 64,3),$$

$$Q_{2r1} = 0,60 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu ve 2. rmutu Q_{2r2}

$$Q_{2r2} = m_{2rV} \cdot (h_{2rR} - h_{2rV}) + m_{2rS} \cdot (c_{p2rR} \cdot t_{2rR} - c_{p2rV} \cdot t_{2rV}), \quad (2.31)$$

$$Q_{2r2} = 16,68 \cdot (419057,73 - 301503,87) + 4,25 \cdot 1000 \cdot (1,74 \cdot 100 - 1,71 \cdot 72),$$

$$Q_{2r2} = 2,18 \text{ MJ}.$$

- Celková energie potřebná k provedení druhého rmutování Q_{2r}

$$Q_{2r} = Q_{2r1} + Q_{2r2}, \quad (2.32)$$

$$Q_{2r} = 0,60 + 2,18,$$

$$Q_{2r} = 2,78 \text{ MJ},$$

$$Q_{2r} = \frac{2,78}{3,16},$$

$$Q_{2r} = 0,77 \text{ kWh}.$$

Nakonec bylo potřeba vypočítat požadované výkony pro jednotlivé kroky ohřevu, jelikož rmutování je poměrně časově náročný proces. Během druhého rmutování byl uvažován teplotní růst v daných oblastech následovně:

- Rychlost ohřevu na vyšší cukrotvornou teplotu $1 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$
- Rychlost ohřevu na teplotu varu $1,5 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$ [9]
- Výkon potřebný pro ohřev na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu P_{2r1}

$$P_{2r1} = \frac{Q_{2r1}}{\tau_{2r1}}, \quad (2.33)$$

$$P_{2r1} = \frac{599740,07}{\frac{(72 - 64,3)}{1} \cdot 60},$$

$$P_{2r1} = 1291,0 \text{ W}.$$

kde: τ_{2r1} doba ohřevu na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu [hod]

- Výkon potřebný pro ohřev na teplotu varu ve 2. rmutu P_{2r2}

$$P_{2r2} = \frac{Q_{2r2}}{\tau_{2r2}}, \quad (2.34)$$

$$P_{2r2} = \frac{2175745,17}{\frac{(100 - 72)}{1,5} \cdot 60},$$

$$P_{2r2} = 1942,6 \text{ W}.$$

kde: τ_{2r2} doba ohřevu na teplotu varu ve 2. rmutu[hod]

2.2.3 Vyslazování

Jedná se o proces, kdy dochází k vyluhování extraktu zachyceného v mlátě horkou vodu. Následně dochází k spojení získaných výstřelků s předkem, což nám dohromady dává celkový objem sladiny.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- teplota vyslazovací vody $t_{Vy} = 78 \text{ °C}$

Následně byly pomocí tabulek a výpočetního programu excel určeny měrné entalpie (viz tabulka 2.4).

Tab. 2.4 Měrné entalpie při vystírání.

měrná entalpie vstupní vody h_{Vv}	42 118,90	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
měrná entalpie vyslazovací vody h_{VyVV}	326 663,24	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Nakonec byla vypočtena energie potřebná pro ohřev vyslázovací vody Q_{Vy} .

$$Q_{Vy} = m_{VV} \cdot (h_{VyVV} - h_{vv}), \quad (2.35)$$

$$Q_{Vy} = 43,70 \cdot (326663,24 - 42118,9),$$

$$Q_{Vy} = 12,43 \text{ MJ},$$

$$Q_{Vy} = \frac{12,43}{3,6},$$

$$Q_{Vy} = 3,45 \text{ kWh}.$$

2.2.4 Chmelovar

Jak již bylo zmíněno, v tomto procesu dochází k povaření sladiny s chmelem, za vzniku mladiny.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- teplota na začátku chmelovaru $t_{chZ} = 70 \text{ °C}$
- teplota varu během chmelovaru $t_{chV} = 100 \text{ °C}$

Jako první bylo potřeba určit jednotlivé hmotnosti, se kterými bylo následně počítáno:

- Hmotnost vody ve sladině při chmelovaru m_{chV}

$$m_{chV} = m_P + m_{VV}, \quad (2.36)$$

$$m_{chV} = 43,7 + 34,982,$$

$$m_{chV} = 78,682 \text{ kg}.$$

- hmotnost extraktu m_{EXT}

$$m_{EXT} = 8,41 \text{ kg}.$$

- Hmotnost vody na konci chmelovaru m_{chK}

$$m_{chK} = m_M - m_{EXT}, \quad (2.37)$$

$$m_{chK} = 70,09 - 8,41,$$

$$m_{chK} = 61,68 \text{ kg}.$$

Jako další byly určeny měrné entalpie a měrné tepelné kapacity na základě tabulek a výpočetního programu excel (viz tabulka 2.5).

Tab. 2.5 Měrné entalpie a cp při chmelovaru.

měrná entalpie vody na začátku chmelovaru h_{chZ}	293 122,54	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při teplotě chmelovaru h_{chV}	419 057,73	J·kg ⁻¹
Měrná entalpie syté páry h_{chP}	2 675 529,33	J·kg ⁻¹
cp extraktu na začátku chmelovaru c_{PchZ}	1,66	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
cp extraktu při teplotě chmelovaru c_{PchV}	1,69	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Následně byly vypočteny jednotlivé energie potřebné k realizaci chmelovaru:

- Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu při chmelovaru Q_{ch1}

$$Q_{ch1} = m_{chV} \cdot (h_{chV} - h_{chZ}) + m_{EXT} \cdot (c_{PchV} \cdot t_{chV} - c_{PchZ} \cdot t_{chZ}), \quad (2.38)$$

$$Q_{ch1} = 78,68 \cdot (419057,73 - 293122,54) + 8,41 \cdot 1000 \cdot (1,69 \cdot 100 - 1,66 \cdot 70),$$

$$Q_{ch1} = 10,35 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná pro odpar během chmelovaru Q_{ch2}

$$Q_{ch2} = m_{chVy} \cdot (h_{chP} - h_{chV}), \quad (2.39)$$

$$Q_{ch2} = (m_{chV} - m_{chK}) \cdot (h_{chP} - h_{chV}),$$

$$Q_{ch2} = (78,68 - 61,68) \cdot (2675529,33 - 419057,73),$$

$$Q_{ch2} = 38,37 \text{ MJ}.$$

kde: m_{chVy} množství odpařené vody [kg]

- Celková energie potřebná k provedení chmelovaru Q_{ch}

$$Q_{ch} = Q_{ch1} + Q_{ch2}, \quad (2.40)$$

$$Q_{ch} = 10,35 + 38,37,$$

$$Q_{ch} = 48,72 \text{ MJ},$$

$$Q_{ch} = \frac{48,72}{3,6},$$

$$Q_{ch} = 13,53 \text{ kWh}.$$

Nakonec bylo nutné určit potřebné výkony pro provoz chmelovaru.

Vstupní hodnoty:

- Rychlost ohřevu při chmelovaru $1,5 \text{ K} \cdot \text{min}^{-1}$
- Doba chmelovaru 90 min [1, 9]

- Výkon potřebný pro ohřev na teplotu chmelovaru P_{ch1}

$$P_{ch1} = \frac{Q_{ch1}}{\tau_{ch1}}, \quad (2.41)$$

$$P_{ch1} = \frac{10350943,67}{\frac{(100 - 70)}{1,5} \cdot 60},$$

$$P_{ch1} = 8625,8 \text{ W}.$$

kde: τ_{ch1} doba ohřevu na teplotu chmelovaru [hod]

- Výkon potřebný pro vaření P_{ch2}

$$P_{ch2} = \frac{Q_{ch2}}{\tau_{ch2}}, \quad (2.42)$$

$$P_{ch2} = \frac{38366310,83}{90 \cdot 60},$$

$$P_{ch2} = 7104,9 \text{ W}.$$

kde: τ_{ch2} doba vaření při teplotě chmelovaru [hod]

2.3 Studená strana

2.3.1 Chlazení mladiny

V tomto procesu dochází ke zchlazení mladiny na zákvasnou teplotu, navíc zde i dochází k oddělování vysrážených kalů a chmelového mláta. K oddělení kalů využijeme vířivé kádě za studena. Ta je oproti vířivé kádi za tepla schopna oddělit i jemné kaly.

Vstupní hodnoty [1, 9]:

- vstupní teplota mladiny $t_{zch} = 98^\circ\text{C}$
- teplota na vstupu do vířivé kádě $t_{vvk} = 30^\circ\text{C}$
- teplota na výstupu z vířivé kádě $t_{kvk} = 30^\circ\text{C}$
- zákvasná teplota $t_{zk} = 7^\circ\text{C}$
- množství mladiny $m_M = 70,09 \text{ kg}$
- hmotnost vody na konci chmelovaru (v mladině) $m_{chK} = 61,68 \text{ kg}$
- množství extraktu (v mladině) $m_{EXT} = 8,41 \text{ kg}$

Jako další byly určeny měrné entalpie a měrné tepelné kapacity pomocí tabulek a výpočetního souboru excel (viz tabulka 2.6).

Tab. 2.6 Měrné entalpie a c_p při chlazení mladiny.

měrná entalpie vody na začátku chlazení h_{zch}	410 737,03	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při vstupu do vířivé kádě h_{zvK}	125 822,51	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při výstupu z vířivé kádě h_{kch}	125 822,51	J·kg ⁻¹
měrná entalpie vody při zákvasné teplotě h_{zt}	29 525,52	J·kg ⁻¹
c_p extraktu na začátku chlazení c_{pzch}	1,68	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p extraktu na vstupu do vířivé kádě c_{pzvK}	1,60	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p extraktu na výstupu z vířivé kádě c_{pkvK}	1,60	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p extraktu při zákvasné teplotě c_{pzt}	1,56	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Následně byly vypočítány jednotlivé energie potřebné pro zchlazení mladiny:

- Energie potřebná k ochlazení mladiny po vířivou kád' Q_{chVK}

$$Q_{chVK} = m_{chK} \cdot (h_{zch} - h_{zvK}) + m_{EXT} \cdot (c_{pzch} \cdot t_{zch} - c_{pzvK} \cdot t_{zvK}), \quad (2.43)$$

$$Q_{chVK} = 61,68 \cdot (410737,03 - 125822,51) + 8,41 \cdot 1000 \cdot (1,68 \cdot 98 - 1,60 \cdot 30),$$

$$Q_{chVK} = 18,56 \text{ MJ}.$$

- Energie potřebná k ochlazení mladiny na zákvasnou teplotu Q_{chZT}

$$Q_{chZT} = m_{chK} \cdot (h_{kch} - h_{zt}) + m_{EXT} \cdot (c_{pkvK} \cdot t_{kvK} - c_{pzt} \cdot t_{zt}), \quad (2.44)$$

$$Q_{chZT} = 61,68 \cdot (125822,51 - 29525,52) + 8,41 \cdot 1000 \cdot (1,60 \cdot 30 - 1,56 \cdot 7),$$

$$Q_{chZT} = 6,25 \text{ MJ}.$$

Jako další byly určeny celkové energie:

- Celková energie potřebná k ochlazení mladiny

$$Q_{chM} = Q_{chVK} + Q_{chZT}, \quad (2.45)$$

$$Q_{chM} = 18,56 + 6,25,$$

$$Q_{chM} = 24,81 \text{ MJ}.$$

- Celková energie potřebná k ochlazení mladiny – Basařová Q_{chMB} [1, s. 207]

$$Q_{chMB} = m_M \cdot c_{PB} \cdot (t_{zch} - t_{zk}), \quad (2.46)$$

$$Q_{chMB} = 70,09 \cdot 3990 \cdot (98 - 7),$$

$$Q_{chMB} = 25,45 \text{ MJ},$$

$$Q_{chMB} > Q_{chM}$$

$$Q_{chMB} = \frac{25,45}{3,6},$$

$$Q_{chB} = 7,07 \text{ kWh}.$$

Jelikož celková energie potřebná k ochlazení mladiny dle Basařové vyšla větší, bude ve finálním součtu energií počítáno s ní.

Nakonec bylo potřeba vypočítat jednotlivé výkony k provedení chlazení mladiny.

Vstupní hodnoty:

- Doba chlazení do vířivé kádě 45 min
- Doba dochlazení na zákvasnou teplotu 15 min [1, 9]

- Výkon potřebný pro zchlazení do vířivé kádě P_{VK}

$$P_{VK} = \frac{Q_{chVK}}{\tau_{VK}}, \quad (2.47)$$

$$P_{VK} = \frac{18557006}{45 \cdot 60},$$

$$P_{VK} = 6873 \text{ W}.$$

kde: τ_{VK} doba zchlazení do vířivé kádě [hod]

- Výkon potřebný pro zchlazení na zákvasnou teplotu P_{ZK}

$$P_{ZK} = \frac{Q_{chZT}}{\tau_{ZK}}, \quad (2.48)$$

$$P_{ZK} = \frac{6251814}{15 \cdot 60},$$

$$P_{ZK} = 6946 \text{ W}.$$

kde: τ_{ZK} doba zchlazení na zákvasnou teplotu [hod]

2.3.2 Hlavní kvašení

Cílem kvašení je přeměna sacharidů na alkohol a CO₂ pomocí přidání pivovarských kvasinek.

Vstupní hodnoty [9]:

- množství extraktu $m_{EXT} = 8,41$ kg
- prokvašení $A_Z = 75$ %

Na základě vstupních hodnot byly dopočítány jednotlivé hmotnosti:

- Hmotnost prokvašeného extraktu m_{Pro} .

$$m_{Pro} = m_{EXT} \cdot A_Z , \quad (2.49)$$

$$m_{Pro} = 8,41 \cdot 0,75 ,$$

$$m_{Pro} = 6,31 \text{ kg} .$$

- Hmotnost zbylého extraktu m_{zb}

$$m_{zb} = m_{EXT} - m_{Pro} , \quad (2.50)$$

$$m_{zb} = 8,41 - 6,31 ,$$

$$m_{zb} = 2,1 \text{ kg} .$$

Nakonec bylo vypočítáno uvolněné teplo během kvašení:

- Uvolněné teplo zkvašením 1 molu jednoduchého cukru $Q_{KV} = 219 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ [1, s. 353]
- molární hmotnost glukózy $M_{GL} = 180,156 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

- Teplo uvolněné kvašením Q_{HK}

$$Q_{HK} = \frac{Q_{KV}}{M_{GL}} \cdot m_{Pro} , \quad (2.51)$$

$$Q_{HK} = \frac{219 \cdot 1000}{180,156 \cdot 0,001} \cdot 6,31 ,$$

$$Q_{HK} = 7,67 \text{ MJ} .$$

2.3.3 Zchlazení do ležáckých sklepů

V ležáckých sklepech dochází k dokvašení, vyčiření a dosažení optimálních vlastností. Vstupní hodnoty:

- teplota chlazení $t_{chl} = 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Jako první byly spočteny základní veličiny potřebné pro následný výpočet množství jednotlivých složek:

- Skutečná cukernatost po hlavním kvašení P_{pHK}

$$P_{pHK} = \frac{m_{zb}}{m_M} \cdot 100, \quad (2.53)$$

$$P_{pHK} = \frac{2,1}{70,09} \cdot 100,$$

$$P_{pHK} = 3 \text{ }^{\circ}\text{P}$$

- Hmotnostní ztráta při stáčení m_z

$$m_z = 0,02 \cdot m_M, \quad (2.54)$$

$$m_z = 0,02 \cdot 70,09,$$

$$m_z = 1,40 \text{ kg}.$$

- Hmotnost mladého piva m_{MP}

$$m_{MP} = m_M - m_z, \quad (2.55)$$

$$m_{MP} = 70,09 - 1,40,$$

$$m_{MP} = 68,69 \text{ kg}.$$

- Obsah alkoholu ABW

$$ABW = \frac{100 \cdot (EPM - P_{pHK})}{(100 \cdot 2,0665 - 1,0665 \cdot EPM)}, \quad (2.56)$$

$$ABW = \frac{100 \cdot (12 - 3)}{(100 \cdot 2,0665 - 1,0665 \cdot 12)},$$

$$ABW = 4,64 \text{ hm. } \%$$

Následně bylo vypočítáno množství jednotlivých složek během procesu chlazení do ležáckých sklepů:

- Hmotnost extraktu během chlazení do ležáckých sklepů m_{chEXT}

$$m_{chEXT} = \frac{m_{MP} \cdot P_{pHK}}{100}, \quad (2.57)$$

$$m_{chEXT} = \frac{68,69 \cdot 3}{100},$$

$$m_{chEXT} = 2,06 \text{ kg}.$$

- Hmotnost ethanolu m_{ETH}

$$m_{ETH} = \frac{m_{MP} \cdot ABW}{100}, \quad (2.58)$$

$$m_{ETH} = \frac{68,69 \cdot 4,64}{100},$$

$$m_{ETH} = 3,19 \text{ kg}.$$

- Hmotnost vody během chlazení do ležáckých sklepů m_{chW}

$$m_{chW} = m_{MP} - m_{chEXT} - m_{ETH}, \quad (2.59)$$

$$m_{chW} = 68,69 - 2,06 - 3,19,$$

$$m_{chW} = 63,44 \text{ kg}.$$

Jako další byly pomocí tabulek a výpočetního programu excel určeny jednotlivé měrné entalpie a měrné tepelné kapacity (viz tabulka 2.7).

Tab. 2.7 Měrné entalpie a c_p při dokvašování piva.

Měrná entalpie vody na začátku chlazení h_{WZ}	29525,52	J·kg ⁻¹
Měrná entalpie vody na konci chlazení h_{WK}	145,40	J·kg ⁻¹
Měrná entalpie ethanolu na začátku chlazení h_{EZ}	-185273,62	J·kg ⁻¹
Měrná entalpie ethanolu na konci chlazení h_{EK}	-201186,88	J·kg ⁻¹
c_p sacharózy na začátku chlazení c_{PSZ}	1,56	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹
c_p sacharózy na konci chlazení c_{PSK}	1,55	kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹

Nakonec bylo vypočítáno teplo odvedené při chlazení Q_{CHL} :

$$Q_{CHL} = m_{chEXT} \cdot (c_{PSZ} \cdot t_{zk} - c_{PSK} \cdot t_{chl}) + m_{ETH} \cdot (h_{EZ} - h_{EK}) + m_{chW} \cdot (h_{WZ} - h_{WK}), \quad (2.60)$$

$$Q_{CHL} = 2,06 \cdot 1000 \cdot (1,56 \cdot 7 - 1,55 \cdot 0,02) + 3,19 \cdot (-185273,62 - (-201186,88)) + 63,44 \cdot (29525,52 - 145,40),$$

$$Q_{CHL} = 1,94 \text{ MJ},$$

$$Q_{CHL} = \frac{1,94}{3,6},$$

$$Q_{CHL} = 0,54 \text{ kWh}.$$

2.4 Celková potřeba energie

V součtu je pro teplou stranu potřeba 21,3 kWh (Tab. 8) a pro studenou stranu 9,73 kWh (Tab. 9).

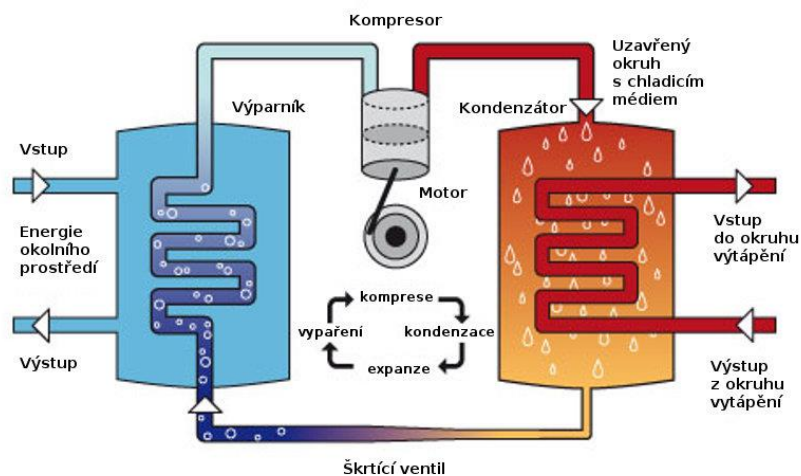
Tab. 8: Energetická bilance teplé strany.

Celková energetická bilance	E [kWh]	
Vystírka + zapářka	2,67	12,5 %
1. rmut	0,87	4,1 %
2. rmut	0,77	3,6 %
Vyslazování	3,45	16,2 %
Chmelovar	13,53	63,5 %
CELKEM	21,30	kWh

Tab. 9: Energetická bilance studené strany.

Celková energetická bilance	E [kWh]	
Chlazení mladiny	7,07	72,6 %
Hlavní kvašení	2,13	21,9 %
zrání	0,54	5,5 %
CELKEM	9,74	kWh

3. Tepelné čerpadlo



Obr. 5. Princip fungování tepelného čerpadla [11].

3.1 Základní charakteristika

Podobně jako lednička odebírá teplo potravinám v ní uložených a odebraným teplem „vytápí“ danou místnost, tak tepelné čerpadlo odebírá teplo z okolního prostředí (obr. 5) a převádí ho na vyšší teplotní hladinu, využitelnou při vytápění objektu, či ohřevu vody.

Princip tepelného čerpadla (vzduch-voda) je prostý. Ve vzduchu je obsažena tepelná energie, kterou se snažíme využít. Teplo z okolí je odváděno pomocí výměníku, kde se nachází chladicí médium v kapalném stavu, které má vždy nižší teplotu, než je teplota okolí. Chladivo, které přijímá teplo z okolního prostředí, se následně odpařuje a zahřívá v kompresoru, čímž jeho teplota rapidně vzroste. Poté dochází k předání tepla topnému okruhu, čímž se chladicí médium, v podobě par, ochlazuje a opět nabývá kapalného skupenství. Nakonec dochází k vyrovnání tlaků a snížení teploty pomocí expanzního ventilu a chladicí médium může opět přijímat teplo z okolního prostředí.

Jelikož dochází k získávání energie z okolního prostředí, získáváme teplo téměř zdarma. Vzhledem k tomu jsou provozní náklady velmi nízké. Nevýhodou zůstává pořizovací cena. Vzhledem k již zmíněným nízkým provozním nákladům a návratnosti okolo 6 let je TČ ekonomicky i ekologicky výhodné [12, 13].

Typy tepelných čerpadel:

- Vzduch – voda
 - Využívají tepelnou energii ze vzduchu, kterou předávají vodě v topném okruhu. Oproti ostatním má nižší účinnost.
- Země – voda
 - Využívá tepelnou energii ze země, prostřednictvím vrtů nebo plošných kolektorů podzemí. Jedná se o nejefektivnější typ tepelného čerpadla s velmi nízkou spotřebou. Oproti ostatním má vyšší pořizovací náklady z důvodu vrtů.
- Voda – voda
 - Využívá tepelnou energii z vody, která prochází výměníkem. Nevýhodou je málo vhodných lokalit a náročnost na chemické složení.

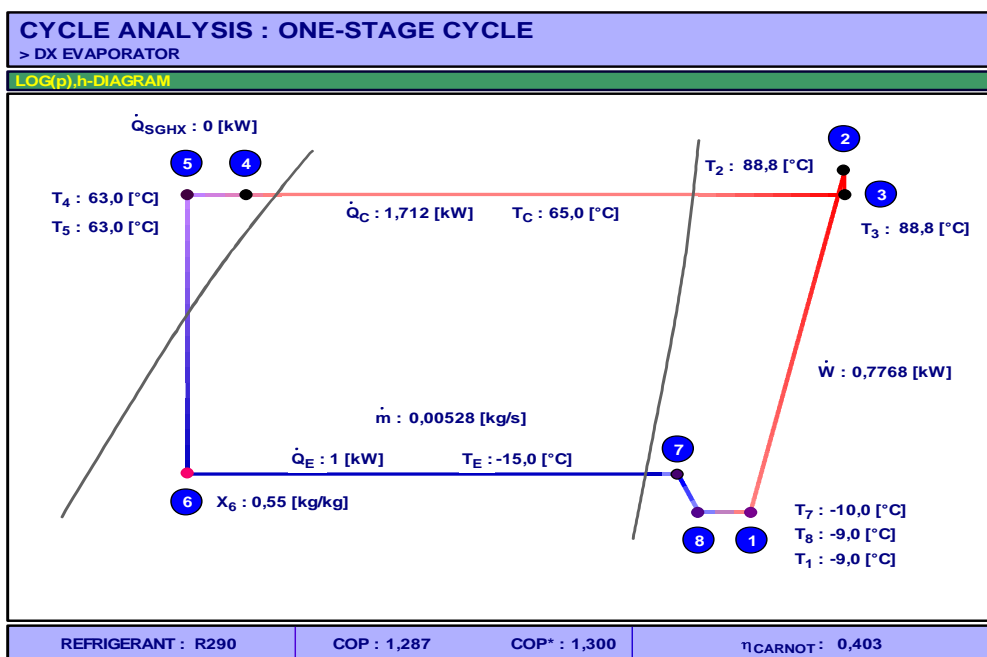
3.2 Využití při výrobě piva

Z energetické stránky se výroba piva dělí, jak již bylo zmíněno v kapitole 2.0, na teplou a studenou stranu. Na teplé straně dochází k zahřívání až na teplotu varu, naopak na studené straně se nejnižší teploty pohybují až okolo $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se znalostmi fungování tepelného čerpadla vyvstává otázka, zdali by nebylo možné využívat studenou stranu ke generování tepla pro stranu teplou.

Pro posouzení byly zvoleny následující hodnoty:

- teplota uložení chladu $t_{\text{chladu}} = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota uložení tepla $t_{\text{tepla}} = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota vypařování $t_{\text{vyp}} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$
- teplota kondenzace $t_{\text{kon}} = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$
- přijatá energie ve výparníku $Q_e = 1\text{ kW}$
- Chladivo = R290 (propan)

Na základě zadaných hodnot bylo pomocí výpočetního programu COOLPACK určeno, že se kondenzační výkon Q_c rovná $1,712\text{ kWh}$ a topný faktor $COP = 1,287$. Z toho vyplývá, že pokud bude vyrobeno $9,74\text{ kWh}$ chladu (studená strana), bude získáno zhruba $16,67\text{ kWh}$ tepla. Aby však bylo pokryto potřebné množství energie pro teplou stranu, která činí $21,3\text{ kWh}$, bude potřeba dodat ještě $4,63\text{ kWh}$ odjinud. Tepelné čerpadlo je však bohužel schopné dosáhnout výstupní teploty tvorby zhruba $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, proto energie dodávaná odjinud, bude ve skutečnosti ještě větší.



Obr. 6: Cyklus tepelného čerpadla pro zadaný problém.

CYCLE SPECIFICATION				
TEMPERATURE LEVELS		PRESSURE LOSSES	SUCTION GAS HEAT EXCHANGER	REFRIGERANT
T_E [°C] :	-15,0	ΔT_{SH} [K] :	5	No SGHX
T_C [°C] :	65,0	ΔP_{SL} [K] :	0,5	
		ΔP_{DL} [K] :	0,5	0,30
				R290
CYCLE CAPACITY				
Cooling capacity \dot{Q}_E [kW]	1	\dot{Q}_E : 1 [kW]	\dot{Q}_C : 1,712 [kW]	\dot{m} : 0,00528 [kg/s]
				\dot{V}_S : 3,06 [m³/h]
COMPRESSOR PERFORMANCE				
Isentropic efficiency η_{IS} [-]	0,7	η_{IS} : 0,700 [-]	\dot{W} : 0,7768 [kW]	
COMPRESSOR HEAT LOSS				
Heat loss factor f_Q [%]	10	f_Q : 10,0 [%]	T_2 : 88,8 [°C]	\dot{Q}_{LOSS} : 0,07768 [kW]
SUCTION LINE				
Unuseful superheat $\Delta T_{SH,SL}$ [K]	1,0	\dot{Q}_{SL} : 10 [W]	T_g : -9,0 [°C]	$\Delta T_{SH,SL}$: 1,0 [K]

		COP : 1,287	COP* : 1,300
--	--	-------------	--------------

Obr. 7: Vstupní hodnoty pro výpočet Q_c .

Závěr

Vzhledem k tomu, že výroba piva má v České republice dlouholetou tradici a neustále dochází k rozšiřování a zakládání nových minipivovarů, bylo cílem této bakalářské práce určit energetickou náročnost výroby piva a zvážit využití tepelného čerpadla, jelikož je výroba piva technologicky náročný proces na čas ve vztahu k požadovaným energiím. Hlavním úkolem této bakalářské práce bylo především zjistit, jaké množství energie je zhruba možné získat zpět při jeho používání.

Pro výpočet energetické náročnosti výroba piva byly zvoleny parametry 12 stupňového ležáku vyráběného dvourmutovou dekokční metodou. Detailními výpočty energetických bilancí bylo dospěno k závěru, že pro realizaci teplé strany bylo potřeba 21,3 kWh a pro studenou stranu 9,74 kWh. Ve výpočtech nebyly zohledněny tepelné ztráty zařízení, jelikož se při posuzování vycházelo z předpokladu, že výrobce bude používat stejnou výrobní a procesní technologii a nebude ji upravovat v případě použití tepelného čerpadla.

Pro posouzení možnosti využití tepelného čerpadla bylo uvažováno tepelné čerpadlo s chladivem R290, vypařovací teplotou $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a kondenzační teplotou $65\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toto tepelné čerpadlo je schopno při výrobě požadovaného množství chladu (9,74 kWh) vyrobit 16,67 kWh tepla. Aby však bylo pokryto celkové potřebné množství tepla pro teplou stranu, které činí 21,3 kWh, bude potřeba dodat ještě 4,63 kWh z jiných zdrojů.

Z výsledků výpočtů tedy vyplývá, že pokud bude použito tepelné čerpadlo během chlazení piva, je možné získat zhruba 2/3 tepelné energie. Tuto energii lze následně využít při jeho vaření, přičemž je nutné 1/3 energie získat odjinud. Závěrem lze tedy konstatovat, že využití tepelného čerpadla během výroby piva je přínosem, a to nejenom z hlediska šetření fosilních paliv a životního prostředí, ale i z hlediska provozních a výrobních nákladů.

Vzhledem ke skutečnosti, že tepelné čerpadlo má omezené možnosti výroby topné vody do maximální výše $60\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$, je nezbytné dořešit pokrytí tepelné energie na vaření, kde je dosahováno teplot okolo $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dořešení této záležitosti ale nebylo zadáním této bakalářské práce.

Zdroje

- [1] BASAŘOVÁ, Gabriela, Jan ŠAVEL, Petr BASAŘ a Tomáš LEJSEK, 2010. *Pivovarství: Teorie a praxe výroby piva*. Praha: VŠCHT Praha. ISBN 978-80-7080-734-7.
- [2] CHODOUNSKÝ, František. *Několik listů o pivě a pivovarství*. Praha: F. Chodounský, 1886.
- [3] BASAŘOVÁ, Gabriela a Ivo HLAVÁČEK. *České pivo*. 2. vyd. Praha: Nuga, 1999. ISBN 80-859-0308-3.
- [4] KOSAŘ, Karel, Stanislav PROCHÁZKA a kolektiv autorů. *Technologie výroby sladu a piva*. Praha: Výzkumný ústav pivovarský a sladařský, 2000. ISBN 80-902658-6-3.
- [5] GRAEBNER, Hagen. Žatecký poloraný červeňák. In: *priroda.cz* [online]. 2015 [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.priroda.cz/clanky.php?detail=2765>.
- [6] Postup výroby piva. *Pivotecka.cz* [online]. Plzeň, c2021 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.pivotecka.cz/vyroba-piva/>.
- [7] Rmutovací postupy. In: BASAŘOVÁ, Gabriela, Jan ŠAVEL, Petr BASAŘ a Tomáš LEJSEK. *Pivovarství: Teorie a praxe výroby piva*. Praha: VŠCHT Praha, 2010, s. 152. ISBN 978-80-7080-734-7.
- [8] Spilka pivovaru Svijany. *Pivovarsvijany.cz* [online]. Svijany, 2018 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: <https://www.pivovarsvijany.cz/novinky-a-akce/rozsirujeme-nejvetsi-klasickou-spilku-v-cesku>.
- [9] NOVOTNÝ, Petr. *Pivařka?: průvodce domácího sládka : teorie, rady, návody, recepty*. V Brně: Jota, 2019. Populárně naučná. ISBN 978-80-7565-555-4.
- [10] TUN, Aye. *Review of the Thermo-physical properties models of foods*. Petrohrad, 2018. ITMO University.
- [11] Jak funguje tepelné čerpadlo? Vyplatí se? *Zdrave-bydleni.com* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.zdrave-bydleni.com/jak-funguje-tepelne-čerpadlo-vyplati-se/>
- [12] SRDEČNÝ, Karel a Jan TRUXA. *Tepelná čerpadla*. Brno: ERA, 2005. 21. století. ISBN 80-736-6031-8.
- [13] *Princip tepelných čerpadel* [online]. IVT tepelná čerpadla [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.cerpadla-ivt.cz/cz/princip-tepelnych-čerpadel>

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Veličina	Jednotka
<i>ABW</i>	Obsah alkoholu	hm. %
<i>AZ</i>	Prokvašení	%
<i>COP</i>	Efektivita tepelného čerpadla	-
<i>CP1rK</i>	Měrná tepelná kapacita sladu na konci rmutování	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP1rN</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při nižší cukrotravné teplotě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP1rR</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při teplotě varu	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP1rV</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při vyšší cukrotravné teplotě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP1rZ</i>	Měrná tepelná kapacita sladu na začátku prvního rmutování	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP2rK</i>	Měrná tepelná kapacita sladu na konci rmutování	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP2rR</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při teplotě varu	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP2rV</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při vyšší cukrotravné teplotě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CP2rZ</i>	Měrná tepelná kapacita sladu na začátku druhého rmutování	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPchV</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu při teplotě chmelovaru	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPchZ</i>	Měrná tepelná kapacita při teplotě na začátku chmelovaru	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPkvk</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu při výstupu z vířivé kádě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPSK</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu (sacharózy) na konci chlazení	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPSZ</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu (sacharózy) na začátku chlazení	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPv</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při vystírce	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPvs</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při vstupní teplotě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPz</i>	Měrná tepelná kapacita sladu při zapáře	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPzch</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu na začátku chlazení	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPzt</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu při zalkvasné teplotě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>CPzvK</i>	Měrná tepelná kapacita extraktu při vstupu do vířivé kádě	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
<i>dh</i>	Změna měrné entalpie	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>dH</i>	Změna entalpie	J
<i>dp</i>	Změna tlaku	Pa
<i>E</i>	Extraktivnost sladu	%
<i>EF_V</i>	Efektivita varny	%
<i>EPM</i>	Extrakt původní mladiny, stupňovitost	hm. %
<i>h_{1rN}</i>	Měrná entalpie vody při nižší cukrotravné teplotě	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{1rK}</i>	Měrná entalpie na konci rmutování	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{1rR}</i>	Měrná entalpie vody při teplotě varu	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{1rV}</i>	Měrná entalpie vody při vyšší cukrotravné teplotě	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{1rZ}</i>	Měrná entalpie vody na začátku rmutování	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{2rK}</i>	Měrná entalpie na konci rmutování	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{2rV}</i>	Měrná entalpie vody při vyšší cukrotravné teplotě	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{2rZ}</i>	Měrná entalpie vody na začátku rmutování	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{EK}</i>	Měrná entalpie ethanolu na konci chlazení	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{EZ}</i>	Měrná entalpie ethanolu na začátku chlazení	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{chP}</i>	Měrná entalpie syté páry	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{chV}</i>	Měrná entalpie vody při teplotě chmelovaru	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{chZ}</i>	Měrná entalpie vody na začátku chmelovaru	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>h_{kch}</i>	Měrná entalpie vody při výstupu z vířivé kádě	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$
<i>HR</i>	Hustota rmutu	$\text{l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{sladu}$
<i>HR_l</i>	Hustota 1. rmutu	$\text{l} \cdot \text{kg}^{-1} \text{sladu}$

HR_2	Hustota 2. rmutu	$l \cdot kg^{-1}_{\text{sladu}}$
h_{vdz}	Měrná entalpie vody do zapáčky	$J \cdot kg^{-1}$
h_{vpv}	Měrná entalpie vody při vystírce	$J \cdot kg^{-1}$
h_{vpz}	Měrná entalpie vody při zapáče	$J \cdot kg^{-1}$
h_{vv}	Měrná entalpie vstupní vody	$J \cdot kg^{-1}$
h_{VyVV}	Měrná entalpie vyslazovací vody	$J \cdot kg^{-1}$
h_{WK}	Měrná entalpie vody na konci chlazení	$J \cdot kg^{-1}$
h_{WZ}	Měrná entalpie vody na začátku chlazení (v ležáckých sklepech)	$J \cdot kg^{-1}$
h_{zch}	Měrná entalpie vody na začátku chlazení	$J \cdot kg^{-1}$
h_{zt}	Měrná entalpie vody při zákvasné teplotě	$J \cdot kg^{-1}$
h_{zvK}	Měrná entalpie vody při vstupu do vířivé kádě	$J \cdot kg^{-1}$
m_{1rS}	Hmotnost sladu v 1. rmutu	kg
m_{1rV}	Hmotnost vody v 1. rmutu	kg
m_{2rS}	Hmotnost sladu ve 2. rmutu	kg
m_{2rV}	Hmotnost vody ve 2. rmutu	kg
m_C	Hmotnost sladu	kg
m_{ETH}	Hmotnost ethanolu	kg
m_{EXT}	Hmotnost extraktu	kg
M_{GL}	Molární hmotnost glukózy	$g \cdot mol^{-1}$
m_{HN}	Hmotnost hlavního nálevu	kg
m_{chEXT}	Hmotnost extraktu během zchlazení do ležáckých sklepů	kg
m_{chK}	Hmotnost vody na konci chmelovaru	kg
m_{chV}	Hmotnost vody ve sladince při chmelovaru	kg
m_{chVy}	Množství odpařené vody	kg
m_{chW}	Hmotnost vody během zchlazení do ležáckých sklepů	kg
m_M	Hmotnost mladiny	kg
m_{MP}	Hmotnost mladého piva	kg
m_P	Hmotnost předku	kg
m_{Pro}	Hmotnost prokvašeného extraktu	kg
m_S	Hmotnost sladiny	kg
m_V	Hmotnost vystírací vody	kg
m_{vdz}	Hmotnost vody do zapáčky	kg
m_{VV}	Hmotnost vyslazovací vody	kg
m_z	Hmotnostní ztráta při stáčení	kg
m_{zb}	hmotnost zbylého extraktu	kg
OG	Původní hustota mladiny	—
p	Tlak referenčního bodu	Pa
P_{1r1}	Výkon potřebný pro ohřev na nižší cukrotrnou teplotu v 1. rmutu	W
P_{1r2}	Výkon potřebný pro ohřev na vyšší cukrotrnou teplotu v 1. rmutu	W
P_{1r3}	Výkon potřebný pro ohřev teploty na teplotu varu v 1. rmutu	W
P_{2r1}	Výkon potřebný pro ohřev na vyšší cukrotrnou teplotu ve 2. rmutu	W
P_{2r2}	Výkon potřebný pro ohřev na teplotu varu ve 2. rmutu	W
P_{ch1}	Výkon potřebný pro ohřev na teplotu chmelovaru	W
P_{ch2}	Výkon potřebný pro vaření	W
P_{pHK}	Skutečná cukernatost po hlavním kvašení	°P
P_{VK}	Výkon potřebný pro zchlazení do vířivé kádě	W
P_{ZK}	Výkon potřebný pro zchlazení na zákvasnou teplotu	W
Q_{1r}	Celková energie potřebná k provedení prvního rmutování	J

Q_{1r1}	Energie potřebná pro ohřev na nižší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r1NS}	Energie potřebná pro ohřev sladu na nižší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r1NV}	Energie potřebná pro ohřev vody na nižší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r2}	Energie potřebná pro ohřev na vyšší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r2VS}	Energie potřebná pro ohřev sladu na vyšší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r2VV}	Energie potřebná pro ohřev vody na vyšší cukrotvornou teplotu v 1. rmutu	J
Q_{1r3}	Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu v 1. rmutu	J
Q_{1r3RS}	Energie potřebná pro ohřev sladu na teplotu varu v 1. rmutu	J
Q_{1r3RV}	Energie potřebná pro ohřev vody na teplotu varu v 1. rmutu	J
Q_{2r}	Celková energie potřebná k provedení druhého rmutování	J
Q_{2r1}	Energie potřebná pro ohřev na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu	J
Q_{2r1VS}	Energie potřebná pro ohřev sladu na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu	J
Q_{2r1VV}	Energie potřebná pro ohřev vody na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu	J
Q_{2r2}	Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu ve 2. rmutu	J
Q_{2r2RS}	Energie potřebná pro ohřev sladu na teplotu varu ve 2. rmutu	J
Q_{2r2RV}	Energie potřebná pro ohřev vody na teplotu varu ve 2. rmutu	J
Q_c	Kondenzační výkon	W
Q_e	Přijatá energie ve výparníku	W
Q_{HK}	Teplo uvolněné kvašením	J
Q_{HN}	Teplo hlavního nálevu	J
Q_{ch}	Celková energie potřebná k provedení chmelovaru	J
Q_{ch1}	Energie potřebná pro ohřev na teplotu varu při chmelovaru	J
Q_{ch1E}	Energie potřebná pro ohřev extraktu na teplotu varu při chmelovaru	J
Q_{ch1V}	Energie potřebná pro ohřev vody na teplotu varu při chmelovaru	J
Q_{ch2}	Energie potřebná pro odpar během chmelovaru	J
Q_{chEM}	Energie potřebná k ochlazení extraktu v mladině	J
Q_{CHL}	Teplo odvedené při zchlazení	J
Q_{CHLE}	Teplo odvedené při zchlazení extraktu	J
Q_{CHLT}	Teplo odvedené při zchlazení ethanolu	J
Q_{CHLW}	Teplo odvedené při zchlazení vody	J
Q_{chM}	Celková energie potřebná k ochlazení mladiny	J
Q_{chMB}	celková energie potřebná k ochlazení mladiny – Basařová	J
Q_{chVK}	Energie potřebná k ochlazení mladiny	J
Q_{chVM}	Energie potřebná k ochlazení vody v mladině	J
Q_{chZT}	Energie potřebná k ochlazení mladiny na zákvasnou teplotu	J
Q_{chZTE}	Energie potřebná k ochlazení extraktu v mladině na zákvasnou teplotu	J
Q_{chZTV}	Energie potřebná k ochlazení vody v mladině na zákvasnou teplotu	J
Q_{KV}	Teplo, které se uvolní z kvašením 1 molu jednoduchého cukru	J·mol ⁻¹
Q_V	Teplo vystírky	J
Q_{vy}	Energie potřebná pro ohřev vyslazovací vody	J

Q_{vz}	Celková energie potřebná pro ohřev na vystírku a zapáрку	J
Q_{vz1}	Energie potřebná pro ohřev vody na vystírací teplotu	J
Q_{vz2}	Energie potřebná pro ohřev sladu na vystírací teplotu	J
Q_{vz3}	Energie potřebná pro ohřev vody pro zapáрку	J
Q_Z	Teplo zapářky	J
t	Teplota referenčního bodu	°C
t_{1rK}	Teplota vystírací kádě na konci 1. rmutování	°C
t_{1rN}	Nižší cukrotravná teplota v 1. rmutování	°C
t_{1rR}	Teplota konce v 1. rmutování	°C
t_{1rV}	Vyšší cukrotravná teplota v 1. rmutování	°C
t_{1rZ}	Teplota vystírací kádě na začátku 1. rmutování	°C
t_{2rK}	Teplota vystírací kádě na konci 2. rmutování	°C
t_{2rR}	Teplota varu ve 2. rmutování	°C
t_{2rV}	Vyšší cukrotravná teplota ve 2. rmutování	°C
t_{2rZ}	Teplota vystírací kádě na začátku 2. rmutování	°C
t_{chl}	Teplota chlazení	°C
t_{chladu}	Teplota pro uložení chladu	°C
t_{chV}	Teplota varu během chmelovaru	°C
t_{chZ}	Teplota na začátku chmelovaru	°C
t_{kon}	Teplota kondenzace	°C
t_{kvk}	Teplota na výstupu z vířivé kádě	°C
t_{Sin}	Vstupní teplota sladu	°C
t_{tepla}	Teplota pro uložení tepla	°C
t_v	Teplota vystírky	°C
t_{Vin}	Vstupní teplota vody	°C
t_{vyk}	Teplota na vstupu do vířivé kádě	°C
t_{Vy}	Teplota vyslazovací vody	°C
t_{vyp}	Teplota vypařování	°C
t_{Vz}	Teplota přiváděné vody do zapářky	°C
t_z	Teplota zapářky	°C
t_{zch}	Vstupní teplota mladiny	°C
t_{zk}	Zákvasná teplota	°C
V_{1r}	Objem 1. rmutu	l
V_{2r}	Objem 2. rmutu	l
V_{HN}	Objem hlavního nálevu	l
V_{CHM}	Ztráty díla v chmelovém mlátě	l
V_M	Objem mladiny	l
V_P	Objem předku	l
V_{piva}	Množství piva	l
V_S	Objem sladiny	l
V_v	Objemová výtrata	%
V_{VV}	Objem vyslazovací vody	l
W	Výkon kompresoru	W
z_{to}	Ztráty odparem při chmelovaru	%
z_{tP}	Ztráty v mlátě	l·kg ⁻¹ _{sladu}
ρ_1	Hustota vody při teplotě na začátku 1. rmutu	kg·m ⁻³
ρ_2	Hustota vody při teplotě vystírací kádě na začátku 2. rmutu	kg·m ⁻³
τ_{1r1}	Doba ohřevu na nižší cukrotravnou teplotu v 1. rmutu	hod
τ_{1r2}	Doba ohřevu na vyšší cukrotravnou teplotu v 1. rmutu	hod

τ_{1r3}	Doba ohřevu na teplotu varu v 1. rmutu	hod
τ_{2r1}	Doba ohřevu na vyšší cukrotvornou teplotu ve 2. rmutu	hod
τ_{2r2}	Doba ohřevu na teplotu varu ve 2. rmutu	hod
τ_{ch1}	Doba ohřevu na teplotu chmelovaru	hod
τ_{ch2}	Doba vaření při teplotě chmelovaru	hod
τ_{VK}	Doba zchlazení do vířivé kádě	hod
τ_{ZK}	Doba zchlazení na zákvasnou teplotu	hod

Seznam příloh

- 1 Výpočet energetické náročnosti výroby piva.xlsx